



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y SISTEMAS
DE TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE CARRERA

Cine en 3D

Adela Burgos González

Septiembre, 2013

RESUMEN

Este proyecto pretende documentar el proceso completo de una producción audiovisual en 3D. Para ello, se hace un recorrido por cada una de sus etapas, desde los primeros pasos de la escritura hasta que la película llega a los espectadores. Como el flujo de trabajo para realizar una película es enorme, el estudio se centra exclusivamente en las peculiaridades estereoscópicas, dejando al margen los procesos habituales de una producción convencional. El proyecto está dividido en cinco grandes bloques, centrados en cada etapa de producción.

El primer capítulo es una introducción al mundo tridimensional, que sienta las bases de la percepción humana para entender cómo funcionan todas las demás etapas. Además, se hace un repaso por los distintos avances producidos en el campo estereoscópico a lo largo de la historia.

El segundo capítulo se centra en la pre-producción, el primer paso para llevar a cabo cualquier proyecto audiovisual, consistente en la planificación del trabajo a realizar y la organización de los distintos elementos que serán necesarios durante el rodaje, teniendo en cuenta desde el primer momento la tercera dimensión.

El tercer capítulo está dedicado a la grabación de las imágenes, centrándose principalmente en las características y configuraciones de las cámaras o *rigs* con los que se obtienen las dos secuencias.

El cuarto capítulo aborda la percepción de la película 3D, explicando las características de los variados sistemas de visualización de las imágenes grabadas, que dan a su vez diferentes sistemas de proyección estereoscópica.

El quinto y último capítulo se centra en el procesado digital de las imágenes estéreo, que permite juntar el material grabado, corregirlo o perfeccionarlo, y darle la forma adecuada de película que llega al público final.

La documentación escrita en español sobre todas estas fases es algo escasa, centrándose normalmente en alguna parte concreta de la cadena, por lo que el proyecto trata también de llenar ese vacío, explicándolo de manera sencilla para hacerlo accesible y factible para toda persona interesada.

ABSTRACT

This project has the intention of document the complete process of 3D audiovisual production. For that reason, we make a journey through each of its stages, from the first steps of writing until the film reaches the final viewers. Since the workflow for a film is huge, the study focuses exclusively on the stereoscopic peculiarities, leaving aside the usual processes of conventional production. The project is divided into five major sections focused on each stage of production.

The first chapter is an introduction to three-dimensional world, which lays the foundation of human perception to understand how the other stages work. In addition, we review the various advances in the stereoscopic field throughout history.

The second chapter focuses on the pre-production, the first step in carrying out any audiovisual project, including the design of all the works to do and the organization of the different elements that will be needed during filming, taking into account the third dimension from the first moment.

The third chapter is devoted to the image recording, focusing mainly on the features and the settings of the cameras or rigs used to obtain the two sequences.

The fourth chapter deals with the 3D film perception, explaining the characteristics of the various systems used for displaying the recorded images, which, in turn, give different stereoscopic projection systems.

The fifth and final chapter focuses on the digital processing of stereo images, which allows collecting all the recorded material, correcting or improving it, and giving it the proper style for a film that reaches the end consumer.

The documents written in Spanish about all these phases are somewhat sparse, usually focusing on a particular part of the chain, so the project also aims to fill that gap, with simple explanations in order to make it accessible and doable for anyone interested.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN AL 3D..... 5

1.1 Fundamentos básicos del 3D

1.1.1 Visión binocular.....	5
1.1.2 Percepción de profundidad.....	7
1.1.3 Problemas con la estereoscopia.....	12

1.2 Historia de la estereoscopia

1.2.1 Primeros pasos del estéreo.....	14
1.2.2 Nacimiento del cine 3D.....	15
1.2.3 Los primeros éxitos.....	17
1.2.4 Revolución de las técnicas 3D.....	18
1.2.5 Cine 3D en la actualidad.....	20

2. PREPRODUCCIÓN DE UN PROYECTO 3D..... 22

2.1 Escribir para 3D

2.1.1 <i>Parallax</i> contado por píxeles.....	22
2.1.2 Presupuesto de profundidad.....	23
2.1.3 Guión de profundidad.....	24

2.2 Dirección de arte y fotografía

2.2.1 Composición de planos.....	26
2.2.2 Otras consideraciones.....	27

3. GRABACIÓN ESTEREOSCÓPICA..... 29

3.1 Fundamentos de fotografía en 3D

3.1.1 Principales parámetros.....	30
3.1.2 Lentes.....	32

3.1.3 Enfoque.....	34
3.1.4 Iluminación.....	35
3.2 Ajustes de la cámara	
3.2.1 Configuración empírica.....	37
3.2.2 Animación del efecto 3D.....	38
3.2.3 Almacenamiento.....	39
3.3 Tipos de cámaras	
3.3.1 Grabación con una sola lente.....	40
3.3.2 Cámaras 3D a partir de cámaras 2D.....	41
3.3.3 Cámaras 3D con ajuste interaxial.....	42
3.4 Formatos y sistemas de grabación	
3.4.1 Formato analógico.....	44
3.4.2 Sistemas de grabación analógica.....	45
3.4.3 Formato digital.....	46
3.4.4 Sistemas de grabación digital.....	48
4. PROYECCIÓN ESTEREOSCÓPICA.....	50
4.1 Percepción en la sala	
4.1.1 Colocación del espectador.....	50
4.1.2 Ventana estereoscópica.....	52
4.1.3 Espacio de la pantalla.....	54
4.2 Sistemas de visualización	
4.2.1 Visión libre paralela.....	56
4.2.2 Visión libre cruzada.....	57
4.2.3 Anáglifo.....	57
4.2.4 Polarización.....	58
4.2.5 Estéreo activo.....	59
4.2.6 Dolby 3D.....	60

4.2.7 ChromaDepth.....	61
4.2.8 Pantallas independientes.....	61
4.2.9 Monitores auto-estéreo.....	62
4.2.10 Auto-estereogramas.....	63
4.2.11 Efecto Pulfrich.....	64
 4.3 Sistemas de proyección	
4.3.1 Pantallas.....	65
4.3.2 Proyección analógica.....	65
4.3.3 Proyección digital.....	67
 5. PROCESADO DEL MATERIAL ESTEREOSCÓPICO.....	69
 5.1 Equipos para trabajar en 3D	
5.1.1 Hardware.....	69
5.1.2 Software.....	72
 5.2 Edición	
5.2.1 Cortes y continuidad.....	73
5.2.2 Edición en 3D.....	74
5.2.3 Subtítulos en profundidad.....	75
5.2.3 Sonido estereoscópico.....	75
 5.3 Composición	
5.3.1 Composición y efectos.....	76
5.3.2 Mapas de profundidad.....	78
5.3.3 Formatos 2D adaptados a 3D.....	79
5.3.4 <i>Rendering</i>	80
5.3.5 Imágenes 3D generadas por ordenador.....	81
5.3.6 Conversión de 2D nativo a 3D.....	82
 5.4 Etalonaje	
5.4.1 Graduación de color.....	85

5.4.2 Graduación de profundidad.....	86
5.5 Empaquetado	
5.5.1 Formato para exhibición cines.....	89
5.5.2 Formato para distribución doméstica.....	90
CONCLUSIONES.....	91
BIBLIOGRAFÍA.....	92

1. INTRODUCCIÓN AL 3D

El mundo que nos rodea es tridimensional, es decir, se puede encajar dentro de 3 dimensiones (3D) espaciales: ancho, alto y profundo. El cine es especialista en conseguir plasmar nuestro entorno y acciones en dos dimensiones (2D, ancho y alto), haciéndonos percibir la tercera inconscientemente. Pero, ¿no será aún más eficaz y potente si nos la muestra directamente?

Para entender cómo producir el efecto estereoscópico, debemos tener ciertos conocimientos previos sobre la visión y la percepción humana, que se abordarán en este primer capítulo. También veremos cómo a lo largo de los años han ido descubriéndose y evolucionando numerosas técnicas y métodos para generar el efecto tridimensional.

1.1. Fundamentos básicos del 3D

Las bases del 3D se asientan sobre el mecanismo de la visión estéreo, que recibe e interpreta las señales visuales del mundo que nos rodea de una determinada manera.

1.1.1. Visión binocular

De manera natural, el mecanismo de visión humana es estéreo, lo que nos permite apreciar las diferentes distancias y volúmenes en el entorno tridimensional que nos rodea. Este sistema se denomina **visión binocular**, y se debe a la separación que hay entre los dos ojos o **distancia interocular**. Debido a ella, nuestros ojos perciben dos imágenes prácticamente iguales pero con el punto de vista ligeramente distinto, produciendo pequeñas diferencias entre sí o **disparidad**. Nuestro cerebro procesa esas diferencias y las interpreta en forma de sensación de profundidad, lejanía o cercanía de los objetos. Este proceso se denomina **estereopsis**, y en él intervienen varios mecanismos.

En primer lugar, cuando observamos objetos muy lejanos, los ejes ópticos de nuestros ojos permanecen **paralelos**. Sin embargo, cuando observamos un objeto cercano, nuestros ojos giran para que los ejes ópticos estén alineados sobre él, es decir, **convergen**.

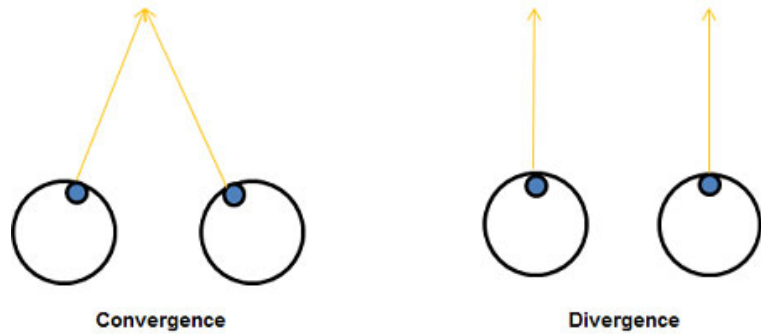
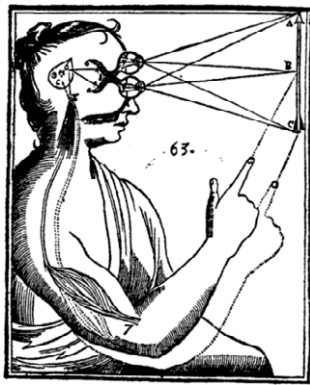


Fig. 1.1. Visión binocular (*de Descartes*). Ejes ópticos convergentes y paralelos (divergentes).

A su vez, se produce la **acomodación** o enfoque para ver nítidamente el objeto. La unión de estos dos mecanismos se llama **fusión**. La capacidad de fusionar un par de imágenes en una sola imagen tridimensional es variable dependiendo del sujeto, siendo problemática en una pequeña parte de la población.

La **agudeza estereoscópica** es la capacidad de discernir detalles situados en planos diferentes y a una distancia mínima mediante la estereopsis. Hay una distancia límite a partir de la cual ya no somos capaces de apreciar la separación de planos (y por tanto percibir la sensación estereoscópica), que varía de unas persona a otras, entre 60 y 200 metros.

Un factor que interviene directamente en esta capacidad es la **distancia interocular**, cuyo valor más habitual es 65 mm (aunque puede variar entre 45 y 75 mm). Cuanto mayor es la separación entre los ojos, mayor es la distancia a la que apreciamos el efecto de relieve. Esto se aplica por ejemplo en los prismáticos, donde se simula mediante prismas una separación interocular efectiva mayor que la normal, consiguiéndose apreciar en relieve objetos distantes que en condiciones normales no seríamos capaces de separar del entorno. También se produce el mismo efecto en la fotografía aérea, donde se obtienen pares estereoscópicos con separaciones de cientos de metros y en los que es posible apreciar claramente el relieve del terreno.

Cuando se reproduce exactamente la visión humana (geometría y perspectiva natural), el tamaño de los objetos es exactamente igual. Este caso es la **orto-estereoscopia**. Si la separación interocular es mayor que la habitual, los objetos parecen más pequeños de lo normal (liliputismo) y la técnica se denomina **hiper-estereoscopia**. El efecto contrario se consigue con la **hipo-estereoscopia**, es decir, con la reducción de la distancia interocular,

imprescindible para obtener imágenes estereoscópicas de pequeños objetos (macrofotografías) o imágenes obtenidas a través de microscopios.

1.1.2. Percepción de profundidad

La reconstrucción tridimensional de lo que nos rodea ocurre en la corteza visual, en la parte posterior del cerebro, y está basada en los estímulos visuales y el conocimiento previo del mundo. Antes de entrar de lleno en la técnica estereoscópica, debemos tener una idea general de las señales que percibimos y nos van dando esa información. Bernard Mendiburu [1] hace esta interesante clasificación de las señales de profundidad:

- **Señales de profundidad monoscópicas:** Hay mucha información 3D que obtenemos a partir de una visión 2D, es decir, que nos la aporta un solo ojo.

A. Perspectiva y tamaño relativo de los objetos, siendo todos conocidos: aunque veamos dos objetos del mismo tamaño, si sabemos que en la realidad no lo son, deducimos la cercanía o lejanía de unos respecto a otros.

B. Oclusión o superposición: cuando un objeto está tapado por otro, significa que está más alejado.

C. Gradiente de textura: en patrones repetitivos, el tamaño disminuye con la distancia.

D. Desenfoque y variación de color por la atmósfera: el aire desenfoca y desatura la imagen de los objetos más alejados, incluso puede llegar a apreciarse un cambio de color azulado (a causa de las partículas de agua) o grisáceo (a causa de la contaminación).

E. Iluminación y sombras en las superficies: las sombras proyectadas por la fuente de luz definen si la superficie está rebajada o sobresale, si es lisa o con textura.

F. Previo conocimiento de las formas de los objetos: guardamos en nuestra memoria la forma de cada objeto que hemos visto, y la recordamos cada vez que nos encontramos de nuevo con ese objeto.

G. Posición relativa al horizonte: cuando los objetos se alejan de nosotros, se acercan al horizonte, que nos marca el límite de lejanía.

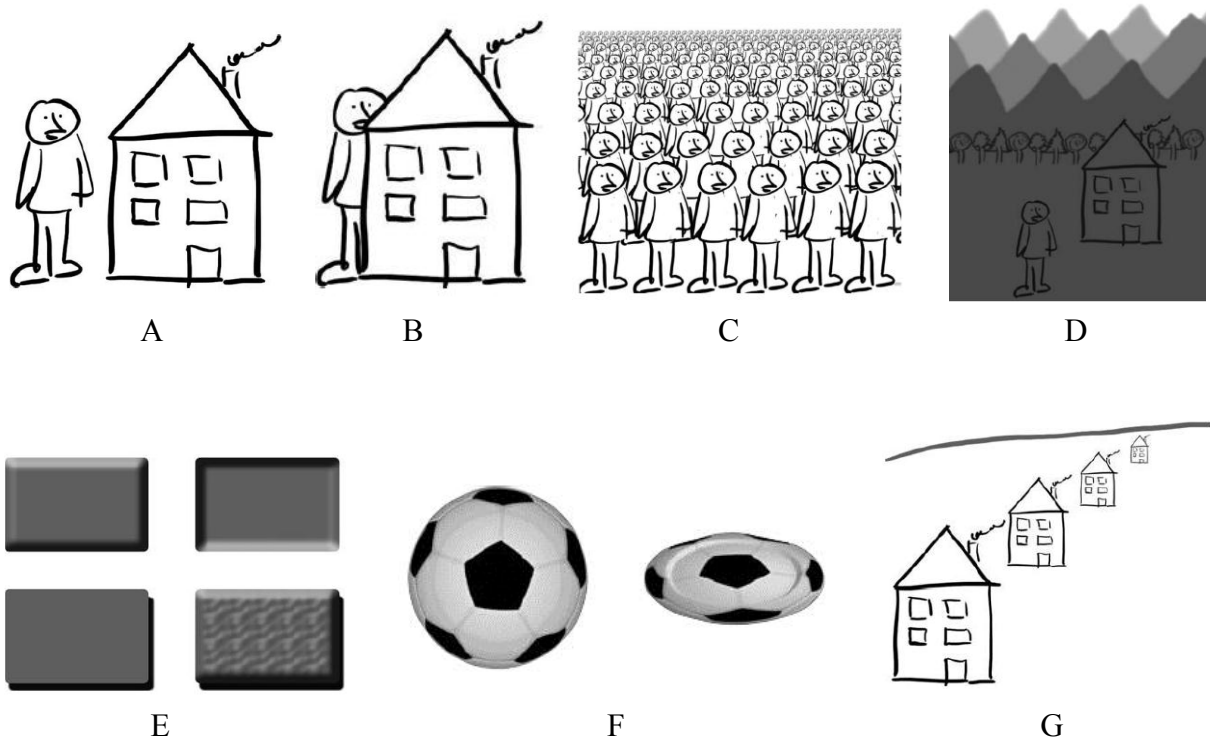


Fig. 1.2. Señales de profundidad monoscópicas.

- **Señales de profundidad basadas en movimiento:** También obtenemos información 3D a partir de las velocidades captadas, la dirección de los movimientos y la ubicación tridimensional del objeto. Así llegamos a uno de los parámetros más importantes de la estereoscopia: el *parallax* (o paralaje), que nos da la posición relativa de la imagen de un objeto en una serie de imágenes consecutivas. Puede ser expresado como un vector de movimiento.

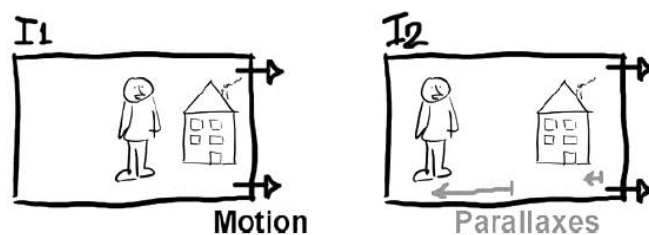


Fig. 1.3. Concepto de *parallax*.

Distinguimos dos tipos:

H. Parallax inducido por el movimiento del punto de vista (observador): desde el simple movimiento de la cabeza, hasta encontrarse dentro de un vehículo en marcha. Cuanto más cerca estemos del objeto que observamos, mayor será el *parallax* apreciado.

I. Parallax inducido por el movimiento del objeto: cuando la velocidad del objeto observado es fija, apreciamos su movimiento más lento cuanto más lejos esté. Asimismo, cuando observamos dos objetos del mismo tamaño, el *parallax* apreciado será menor cuanto más alejado esté.

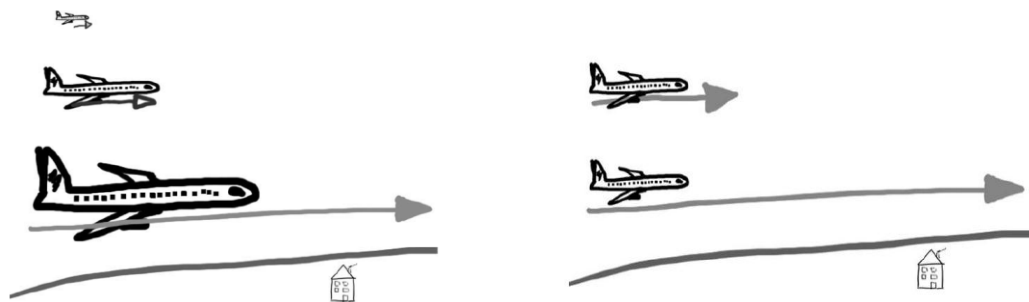


Fig. 1.4. Señales de profundidad basadas en el movimiento del objeto (I).

- **Señales de profundidad estereoscópicas:** Obtenemos la información puramente estereoscópica a través de los dos ojos, es decir, mediante las disparidades entre los dos puntos de vista.

J. Parallax horizontal: el tamaño de las disparidades nos da la distancia de los objetos. Al estar nuestros ojos desplazados en el eje horizontal, es este eje en el que se medirán las disparidades entre las dos imágenes. Cuanto más cerca esté el objeto, más grandes serán las disparidades apreciadas (mayor valor de *parallax*).

K. Revelaciones de oclusión: cuando un objeto tapa a otro, hay partes que no se ven con un ojo pero sí son apreciadas por el otro. Esa parte del objeto revela mucha información tridimensional.

L. Cambio de forma: cada ojo ve una cara lateral del objeto y combina ambas creando

la imagen 3D. Esta vista depende de la distancia al objeto, pues cuanto más cerca esté, mayor parte lateral apreciamos. También depende de la distancia interocular, que puede aumentar o disminuir la percepción del tamaño del objeto.

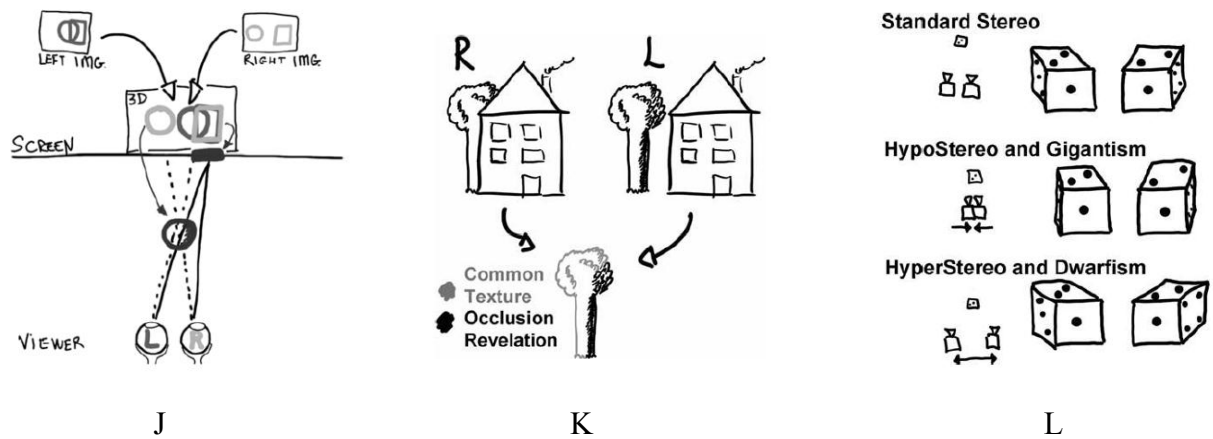


Fig. 1.5. Señales de profundidad estereoscópicas.

- **Señales de propiocepción:** Se basan en el sentido que informa al organismo de la posición de los músculos, de su movimiento y orientación espacial derivados de estímulos dentro del cuerpo.

M. Divergencia y convergencia: cuando los dos ojos apuntan a un objeto, deducimos la cercanía o lejanía de este según el esfuerzo requerido en el enfoque, que será mayor para objetos más cercanos (ejes convergentes).

N. Decorrelación entre la convergencia y la adaptación: la convergencia se produce en la imagen 3D (virtual) del objeto, flotando en algún lugar de la sala entre el observador y la pantalla, mientras que la adaptación (enfoque) se da en la pantalla. Cuanto más separados estén estos dos puntos, más esfuerzo ocular se requiere. En 2D, convergencia y adaptación sí coinciden (ambas sobre el objeto en la pantalla).

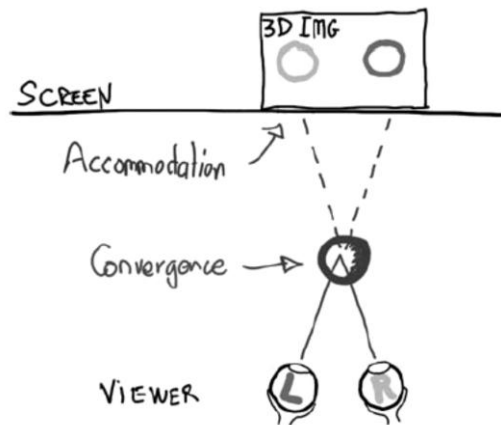


Fig. 1.6. Convergencia y acomodación (N).

- **Rangos y límites de la percepción de profundidad estereoscópica:** Así como las señales monoscópicas no tienen ningún rango de limitación, en 3D éste sí existe. Se define así una zona de confort estereoscópica, dentro de la cual se puede apreciar sin problemas el efecto tridimensional.

O. Distancia máxima y mínima: límites de lejanía y cercanía de la zona de confort (desarrollado en el apartado 4.1.3 *Espacio de la pantalla*). Cuando el objeto está demasiado alejado, los dos ojos ven la misma imagen y se pierde el efecto de profundidad. Si el objeto está demasiado cerca, cada ojo ve una imagen muy distinta, imposibilitando la fusión y produciéndose por tanto rivalidad retinal.

P. Limitación del rango de fusión: al convertir dos imágenes 2D en una 3D, nuestros ojos no pueden fusionar dos objetos muy distantes entre sí a la vez usando la misma convergencia.

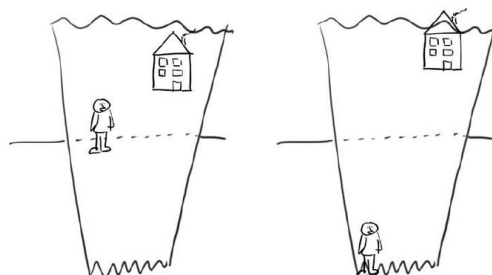


Fig. 1.7. Limitación del rango de fusión (P).

1.1.3. Problemas con la estereoscopia

No siempre se puede apreciar adecuadamente el efecto 3D, sino que hay algunas circunstancias en las que la visión estereoscópica es imposible o deficiente.

La **ceguera de estéreo** consiste en una pobre visión binocular (asimetría o falta de correlación) de la persona. Cuando un ojo es dominante sobre el otro, el cerebro sólo forma una imagen 2D. Este problema afecta a un rango entre el 3 y el 15% de la población.

Por otro lado, puede tenerse un **mal 3D** por diversos errores en la post-producción de las imágenes 2D, por una proyección incorrecta o por el mal uso de las gafas. Las imágenes izquierda y derecha deben ser idénticas en todas sus características, excepto un ligero desplazamiento horizontal en las posiciones de objetos, formas y texturas. Cualquier otra discrepancia en la iluminación, el tiempo o el enfoque, daría lugar a molestias visuales y, finalmente, a la fatiga visual y consecuentes dolores de cabeza. Simon Reeve y Jason Flock [3] explican algunos de los errores más comunes (que irán apareciendo a lo largo de los demás capítulos):

- **Disparidades verticales:** Si las imágenes no están bien alineadas verticalmente, para enfocar los objetos nuestros ojos tienen que hacer un movimiento vertical que no es natural y resulta incómodo.



Fig. 1.8. Error por disparidades verticales.

- **Rivalidad retinal:** Cuando algo aparece sólo en una de las dos vistas, el espectador no puede fusionar las imágenes. Esto puede suceder en forma de reflejos, brillos o artefactos de movimiento. El resultado suele ser que se alternan las dos imágenes,

siendo en cada momento una vista y la otra suprimida.

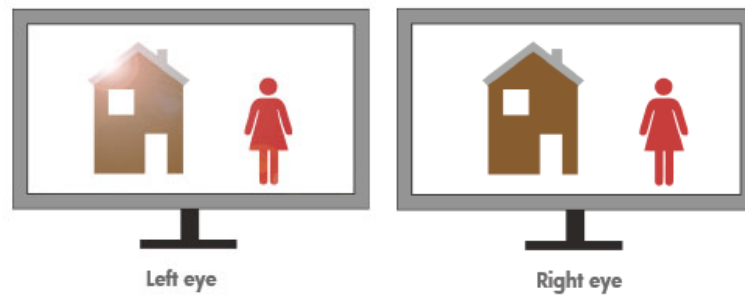


Fig. 1.9. Rivalidad retinal.

- **Ghosting (o crosstalk):** Está causado por el cruce de las señales entre los dos ojos, cuando una imagen que debería ser para el ojo izquierdo aparece parcialmente sobre el derecho, y viceversa. Se aprecia más en imágenes con mucho contraste.
- **Keystoning:** La posición convergente de las cámaras causa una distorsión de la perspectiva que hace crecer los bordes de las imágenes izquierda y derecha de manera inversa.



Fig. 1.10. Efecto *keystoning*.

1.2. Historia de la estereoscopía

1.2.1. Primeros pasos del estéreo

Grandes personajes de la historia, como los griegos Euclides (s. III A.C.), Ptolomeo y Galeno (s. II), los científicos Kepler y Descartes (s. XVII), e incluso el pintor Leonardo da Vinci (s. XV), ya realizaron los **primeros estudios** sobre la óptica humana, la visión binocular y la percepción tridimensional, siendo considerados los pioneros en este tema.

Pero la estereoscopía como tal nació en 1838, curiosamente precediendo a la fotografía (que dio sus primeros pasos un año más tarde). Fue a partir de que el físico británico Charles Wheatstone describiera con cierto rigor el fenómeno de la visión binocular e inventara el **estereoscopio**, un gran aparato que creaba la ilusión de 3D o profundidad a través de dos imágenes.

En 1849, David Brewster (inventor del *caleidoscopio*) construyó la **primera cámara fotográfica estereoscópica**, con la que obtuvo las primeras fotografías en relieve. Construyó también un visor con lentes correctivas para poder observarlas de más cerca, disminuyendo el tamaño del aparato y de las láminas. No tuvo demasiado éxito hasta que en 1851 la Reina Victoria de Inglaterra se interesó en las fotos estereoscópicas y Brewster aprovechó para comercializarlo.

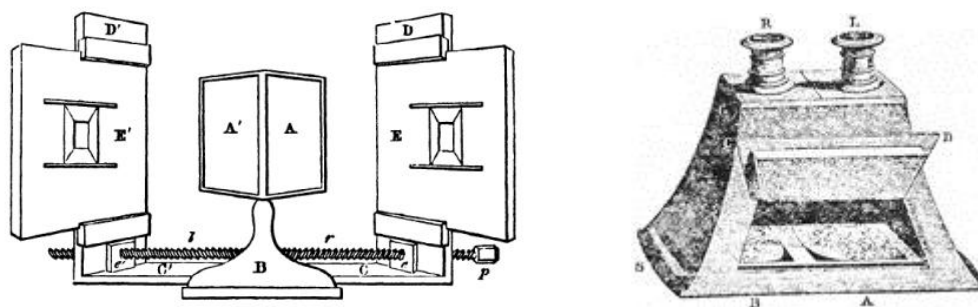


Fig. 1.11. Estereoscopio de Wheatstone y cámara fotográfica estereográfica de Brewster.

A partir de entonces, muchos científicos empezaron a estudiar la estereopsis, y se crearon **numerosos inventos** como el *estereoforoscopio*, el *kinimoscopio* o el *fenakistoscopio*. En 1850, los norteamericanos William y Frederick Langenheim presentaron el *estereopticón* o *linterna mágica*, que proyectaba diapositivas mediante dos lentes, fundiendo una imagen con

la otra, lo que creaba una animación.

En 1853, el alemán Wilhelm Rollmann describió por primera vez el método de los **anáglifos**, que utilizaban los filtros de colores para recrear la profundidad. En 1858, Joseph D’Almeida efectuó la primera proyección tridimensional usando la linterna mágica y gafas rojo/verde. Finalmente, en 1891, Louis du Hauron (inventor de la fotografía en color) desarrolló y patentó el proceso que permite obtener fotos 3D mediante la impresión sucesiva de las dos imágenes del par sobre la misma hoja.

En 1862, el americano Oliver Wendell Holmes construyó otro modelo de **estereoscopio de mano** que se hizo muy popular. Con él podían verse en relieve fotografías estereoscópicas montadas sobre un cartón. Se crearon extensas colecciones y se pusieron a la venta por todo el mundo. Poco después la moda empezó a desaparecer, terminando así el “primer boom” del 3D.

También en otros ámbitos se ha usado la representación estereoscópica. Ilustres **científicos**, como Santiago Ramón y Cajal, utilizaron la estereoscopia para presentar sus trabajos científicos (muestras para microscopio en fotografías estereoscópicas). Por otro lado, **en el arte**, el pintor Salvador Dalí utilizó un dispositivo de espejos similar al de Wheatstone para mostrar algunas de sus obras.

1.2.2. Nacimiento del cine 3D

El cine nació en 1895. Una de las **primeras películas** (que duraba un minuto) fue *L’arrivée du train à La Ciotat* (*La llegada del tren a la estación*, de los hermanos Lumière), que hizo levantar a muchos espectadores de sus asientos pensando que el tren se les echaba encima, a pesar de que estaba filmada y proyectada en dos dimensiones.

La **primera cámara de cine estereoscópica** fue inventada por el inglés William Friese-Greene en 1890 (poco antes de que Edison y Dickson presentasen la patente para su cámara de cine). En 1899, realizó los primeros experimentos de cine en 3D, pero no tuvo éxito debido a lo complejo del mecanismo.

En 1915, se realizó en New York la **primera proyección de 3D**, mostrando tres cortometrajes mediante el sistema anáglifo, pero fue un fracaso ya que las imágenes se

difuminaban bastante y los asistentes acabaron con dolor de cabeza. El éxito no llegó hasta años más tarde, cuando se estrenó la primera película en 3D en las salas comerciales de Los Ángeles. Se trataba de *The power of love* (*El que ella quiere*, 1922, de Nat C. Deverich) producida en el mismo sistema anáglifo por Harry K. Fairall y Robert F. Elder.

Entre los años 20 y 30 se produjeron numerosos **cortometrajes en tres dimensiones**, lo que contribuyó a investigar las técnicas y a afianzar el sistema de filmación y proyección.

Mientras, el cine convencional seguía avanzando. Se realizaron las primeras películas **en color** con la tecnología “technicolor”, como *The Toll of the Sea* (1922, de Chester M. Franklin) y nació el cine **sonoro** con *The Jazz Singer* (*El cantor de jazz*, 1927, de Alan Crosland). Estos cambios se trasladaron también al cine en tres dimensiones, siendo *Audioscopiks* (1935, de Pete Smith) el primer cortometraje sonoro en relieve, y la italiana *Nozze vagabonde* (*Bodas vagabundas*, 1936, de Guido Brignone) la primera película hablada en 3D.



Fig. 1.12. Cámara de Friesse-Greene, público con gafas anáglifo y cartel de una de las primeras películas 3D.

Otro sistema muy popular para la proyección estereoscópica es mediante la **polarización** de la luz. Los filtros polarizados fueron descritos por William Bird Herapath en 1852, pero eran de muy mala calidad. En 1928, Edwin H. Land creó para *Polaroid* un nuevo filtro para la polarización de la luz en base a los descubrimientos anteriores. En 1935, se presentaron las primeras películas estereoscópicas con filtros polarizados, siendo la alemana *Zum greifen nah* (1937) la primera en 3D en color que utilizaba este sistema.

En 1938, comenzaron a experimentar los rusos con su **Stereokino**, un sistema en relieve sin gafas coloreadas, que tuvo su primera demostración pública en 1941. *Robinson Kruzo* (1946, de Aleksandr Andriyevsky) fue el primer largometraje en 3D, sonoro y en color, proyectado sobre una pantalla de metal, con unas aristas que reflejaban dos imágenes separadas, una para el ojo derecho y otra para el izquierdo, dando la sensación de relieve.

Además, durante los años 30 hubo un resurgir de la **fotografía estéreo**, a raíz de la aparición de cámaras 3D con película de 35 mm, como la *Realist* o la *ViewMaster* (1936), que facilitaban al aficionado la obtención de este tipo de imágenes.



Fig. 1.13. Sistema de cine *Stereokino* y cámara de fotos *View-Master*.

1.2.3. Los primeros éxitos

La II Guerra Mundial fue muy perjudicial para la investigación cinematográfica. Además, el auge de la televisión hacía que muchos espectadores se quedaran en sus casas. Por eso, a principios de los años 50 los empresarios se vieron obligados a innovar y se decidieron por la explotación comercial de películas 3D.

Las películas en color de esa época se lograban mediante la filmación de tres películas simultáneas sincronizadas y con filtros (rojo, verde y azul) para lograr el resultado final en colores. Este mismo sistema podía ser adaptado para filmar en 3D. El formato *Natural Vision*, inventado por M. L. Gunzberg, consistía en dos rollos de película que se proyectaban al mismo tiempo sincronizados. Con este sistema y a partir de película y filtros Polaroid, se creó el largometraje 3D en color *Bwana Devil* (*Bwana, el diablo de la selva*, 1952, de Arch Oboler), que fue un éxito de taquilla. Después, la *Warner Bros* estrenó *House of wax* (*Los*

crímenes del Museo de cera, 1953, André de Toth), que añadía sonido estereofónico, y estaba protagonizada por Vincent Price, el actor que más veces actuó en el cine en relieve. Durante el 1953 se estrenaron 27 películas en 3D, seguidas por otras 16 al año siguiente. Incluso se presentaron los primeros dibujos animados en relieve, realizados por el británico Norman McLaren en 1951.

Durante estos años los estudios comenzaron a pensar en hacer todo en 3D. Pero la calidad temática de las películas era cada vez peor, centrándose sólo en los efectos 3D, por lo que se generó una oleada de “basura 3D” que los estudios lanzaban al mercado semanalmente. No obstante hubo ciertos éxitos, como *Kiss me Kate* (*Bésame Kate*, 1953, de George Sidney), *Creature from the Black Lagoon* (*La mujer y el monstruo*, 1954, de Jack Arnold) o *Dial M for Murder* (*Crimen perfecto*, 1954, de Alfred Hitchcock), realizada para tres dimensiones aunque en todo el mundo se vio en dos dimensiones. Y volvió a pasar lo mismo que un siglo antes: la gente se empezó a cansar de la “moda”. Tampoco ayudaron la falta de experiencia de los directores y técnicos, la invención de otros sistemas espectaculares como el *cinemascope*, y los fallos en el revelado y en la sincronización, que frenaron durante unos años el avance de las tres dimensiones.

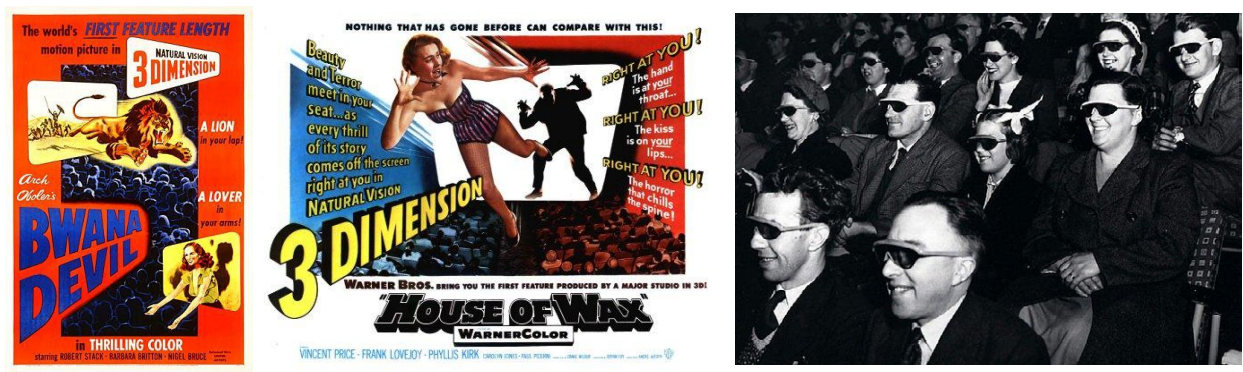


Fig. 1.14. Carteles de algunas de las películas estrenadas en los 50 y público en el cine con gafas polarizadas.

1.2.4. Revolución de las técnicas 3D

A pesar de la decadencia del cine en relieve, los grandes estudios siguieron investigando y solventando problemas técnicos, para intentar resucitar el formato. Se profundizó más seriamente y se empezaron a tomar en cuenta la distancia interocular y la convergencia en base a las lentes utilizadas. La primera película exhibida en *cinemascope* y tres dimensiones fue *September Storm* (*Un Septiembre Borrascoso*, 1960, de Byron Haskin).

Arch Oboler creó el sistema *Space-Vision 3D*, en el que las dos imágenes que antes debían reproducirse cada una en un proyector, se superponían en una sola cinta de celuloide, por lo que era suficiente con un solo proyector al que se le insertó una lente especial. Con este procedimiento realizó el largometraje *The Bubble* (1966), que supuso el resurgimiento del cine en relieve y el interés de muchos estudios de cine.

La marca *Stereo-Vision* desarrolló otro sistema, en el que las imágenes eran comprimidas una al lado de la otra sobre una misma tira de película de 35mm y proyectadas mediante una lente anamórfica a través de filtros *Polaroid*. Con este sistema se eliminaba el peligro de la desincronización. Así se produjo la exitosa comedia erótica *The Stewardesses* (1969, de Al Silliman Jr.).



Fig. 1.15. Carteles de algunas de las películas estrenadas en los 60.

En 1970, Stephen Gibson patentó el sistema *Deep Vision*, basado en anáglifos rojo-cyan, que se convertiría en el más utilizado, ya que puede reproducir el color de la piel y otros colores mejor que el rojo-azul o rojo-verde. Unos años más tarde, Stephen McAllister diseñó las primeras **gafas de obturación de cristal líquido (LCD)**, aunque no se llegaron a comercializar hasta 1980, cuando Lenny Lipton y su empresa *StereoGraphics* lanzaron al mercado su versión de gafas *CrystalEyes*. Por otro lado, en 1979, Christopher Tyler inventó el **auto-estereograma**.

En los años 80, el nuevo formato **IMAX** hizo furor entre los espectadores, sobre todo en ferias internacionales y parques temáticos. Los espectadores participaban en la acción,

gracias al completo panorama de todas las imágenes al ampliar el campo de vista. Las nuevas lentes polarizadas y los equipos de sonido, que rodeaban al espectador, le ayudaban a crear un ambiente en el que se veía totalmente inmerso. El sistema utilizaba dos lentes de la cámara para representar a los ojos derecho e izquierdo, almacenando la grabación en dos rollos de película por separado, y proyectándola de forma simultánea. Destacan películas como *Transition* (1986, Colin Lowse) en Imax 3D, o *Captain Eo* (1986, Francis Ford Coppola) en un parque temático de *Disney*.

En los años 90, los **avances de la informática** permitieron presentar 3D en monitores de ordenador, generando espectaculares imágenes de síntesis en relieve, para aplicaciones científicas, industriales o de entretenimiento. Incluso la NASA ha utilizado la estereoscopia como una herramienta para ver en 3D y analizar las imágenes de Marte enviadas por la sonda *Pathfinder*.

1.2.5. Cine 3D en la actualidad

Estamos viviendo la cuarta resurrección del 3D, en busca de nuevos estímulos visuales para combatir el pirateo de películas y la pereza de muchos espectadores de acudir a las salas cinematográficas. Lo único positivo que esto trae consigo, es que se siguen investigando y aplicando nuevas técnicas digitales; y eso, en buenas manos cinematográficas, puede producir magníficos productos. Los sistemas son tecnológicamente casi perfectos y la gente está muy capacitada. El objetivo actual de productores y cineastas es ofrecer una experiencia espectacular, que hipnotice al espectador y que aporte una sensación que difícilmente puede vivirse en el sofá de casa o en la pantalla del ordenador.

El director **James Cameron** ha sido una figura esencial en estos avances. *Ghosts of the Abyss* (*Misterios del Titanic*, 2003) fue el primer largometraje en formato 3D-IMAX que se editó con el sistema *Reality Camera*, una cámara de vídeo muy ligera que puede llevarse en el hombro, con formato HDTV en lugar de película. Después realizó *Aliens of the Deep* (*Misterios del océano*, 2005) creando nuevos modelos de cámara e introduciendo la posibilidad de rodar primerísimos planos. Las técnicas han sido refinadas y reajustadas, y al mismo tiempo se han mejorado los contenidos, dando lugar a una larga lista de películas de distintos directores. Algunas de ellas han superado todos los récords de taquilla, como es el caso de su película más famosa, *Avatar* (2009), que resultó un gran fenómeno mundial.



Fig. 1.16. Jeffrey Katzenberg, James Cameron y Steven Spielberg con el *Reality Camera System*.

En cuanto al **cine de animación**, el primer largometraje en formato 3D-IMAX fue *Polar Express* (*El Expreso Polar*, 2004, de Robert Zemeckis), reprocesado por completo para que pudiera disfrutarse en tres dimensiones. La recaudación fue 14 veces superior a la versión en 2D, lo que reavivó nuevamente el interés por el cine en 3D. Se han producido re-estrenos en versión 3D de clásicos como *Toy Story*, *Shrek*, *Nightmare Before Christmas* o *El rey león*. Pero el verdadero avance se ha producido en la proyección digital, al no ser ya necesario sincronizar dos proyectores. Con este método se han estrenado películas como *Coraline* (*Los mundos de Coraline*, 2009, Henry Selick), la primera película de animación *stop-motion* planificada y fotografiada directamente en 3D.

La reconversión de las salas para el nuevo sistema digital en 3D es de precio muy elevado, pero se está extendiendo por todo el mundo poco a poco, pues Hollywood ha apostado por ello y se prevé que esta vez el cine estereoscópico ha vuelto para quedarse. Aunque tras el fuerte impulso inicial, ahora se mantenga un ritmo más pausado, siempre hay al menos una película 3D en la mayoría de las carteleras.

Además, más allá del mundo del cine, la tecnología estereoscópica sigue expandiéndose a otros ámbitos. Empresas como *Philips* o *Sony* van desarrollando sus **televisores auto-estereoscópicos** (que no requieren el uso de gafas) y algunas cadenas de televisión ya han realizado retransmisiones en tres dimensiones. Nos encontramos en un nuevo y definitivo boom del 3D.

2. PREPRODUCCIÓN DE UN PROYECTO 3D

La etapa de preproducción de cualquier proyecto requiere atravesar numerosos pasos comunes para cualquier producción audiovisual: escritura del guión literario, selección del equipo técnico y artístico, búsqueda de localizaciones y otros elementos necesarios, financiación, etc. Aquí nos centraremos sólo en los aspectos que diferencian un proyecto tridimensional de uno en 2D. Cada tipo de película requiere un tratamiento de profundidad diferente, por lo que cuanto antes se piense en el 3D, mejor calidad tendrá la película. Es necesaria una planificación previa del proyecto, teniendo en cuenta el factor tridimensional desde el primer momento.

2.1. Escribir para 3D

En el cine estereoscópico, el cuadro pasa a ser un volumen. El efecto 3D debe estar distribuido cuidadosamente para que el espectador no perciba cuándo hay más o menos. No debe dañarse la historia ni al público con la profundidad, sino que debe servir para acompañar y potenciar la trama. Para ello, se han normalizado la medida del *parallax* y una serie de herramientas: el presupuesto de profundidad especifica todo el 3D de una película, que se distribuye a través del guión de profundidad, aprovechando el paréntesis de profundidad dentro de una posición dada.

2.1.1. Parallax contado por píxeles

Se digitaliza el concepto de *parallax*, permitiendo así que sea contado de forma precisa en píxeles. Antiguamente se usaba un valor porcentual sobre el tamaño en la pantalla, y en trigonometría se mide como un valor angular, pero tampoco es preciso sin saber exactamente el tamaño de la pantalla ni la distancia del espectador. Por ello, actualmente se cuenta el número de píxeles que separan el límite de un objeto entre las dos imágenes, derecha e izquierda, cuando visualizamos las dos juntas y sobrepuestas.

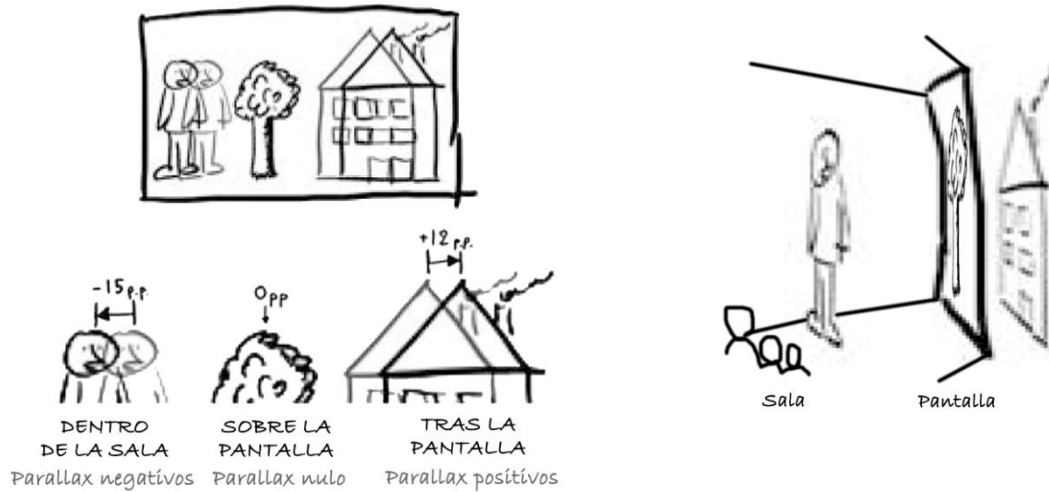


Fig. 2.1. *Parallax* contado por píxeles.

2.1.2. Presupuesto de profundidad

El **presupuesto de profundidad** define la zona de confort donde se debe colocar todo el 3D. Los valores límite son simétricos, generando una visión paralela hacia el infinito y una visión cruzada convergente al 50% de la distancia a la pantalla. Dependiendo de las necesidades artísticas, se puede expandir este rango a más del doble de lo que el ojo ve en *parallax* positivos y hasta 3 o 4 veces los *parallax* negativos.

Los valores de *parallax* positivos o negativos muy extremos en la composición de un plano resultan incómodos y difíciles de ver, por lo que no hay que salirse del rango anterior ni cubrir todo el “estado real estereoscópico” (espacio donde se sitúa todo el 3D que nos rodea). La porción del espacio que se usa en nuestras imágenes concretas es el **paréntesis de profundidad** (*depth bracket*) y está definido por la distancia interocular. La posición de ese paréntesis dentro de todo el estado real posible es la **posición de profundidad** (*depth position*) y está definida por el punto de convergencia.

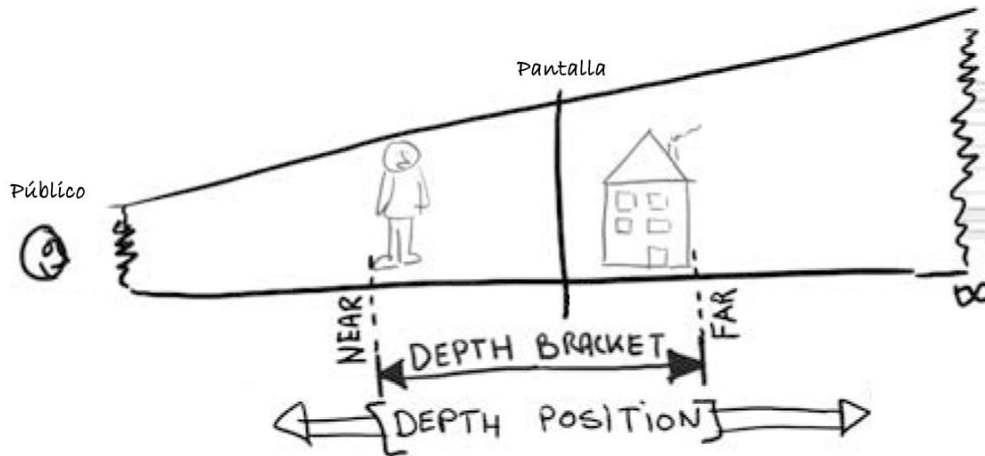


Fig. 2.2. Paréntesis y posición de profundidad.

Aparece también el concepto de **píxeles de *parallax* de la pantalla nativa (NSPP)**, que define el valor máximo de *parallax* que puede soportarse según la pantalla en la que se vaya a proyectar. Cuanto menor sea la pantalla, mayor podrá ser el *parallax* soportado. Este valor se calcula con la siguiente fórmula:

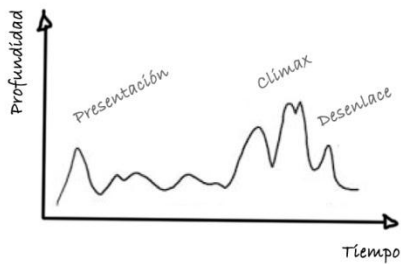
$$\text{NSPP (píxeles)} = (65 \text{ mm} / \text{Ancho_Tamaño_Pantalla}) * \text{Ancho_Resolucion_Píxeles}$$

Por ejemplo, para una pantalla de 23" (50cm), los objetos que requieran las disparidades mayores podrán alcanzar un *parallax* de 250 píxeles, pues: NSPP= (65mm/500mm) * 1920pix = 250 píxeles.

2.1.3. Guión de profundidad

El **guión de profundidad** planifica la cantidad de profundidad a través del tiempo, es decir, la distribución del presupuesto de profundidad (que puede ser lineal o asignada según el argumento). Se suele representar a través de una línea temporal expresando la cantidad de 3D de cada secuencia. Puede ser un gráfico (que incluya los detalles de cercanía/lejanía en cada momento) o un texto (notas sobre los planos). Es aconsejable alternar secuencias con mucho o poco efecto tridimensional para que la audiencia no se canse. Por otro lado, es importante mantener cierta continuidad y no hacer cortes con cambios de profundidad demasiado bruscos.

GUIÓN DE PROFUNDIDAD SIMPLE:



GUIÓN DE PROFUNDIDAD DETALLADO:

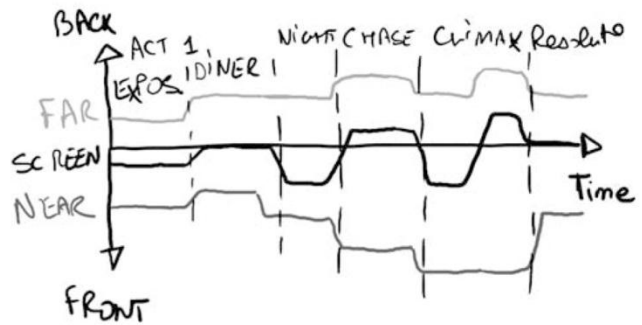


Fig. 2.3. Diferentes guiones de profundidad en forma de gráficos.

El **storyboard** explica visualmente la profundidad de cada escena. Puede hacerlo mediante el *código de pincelada* (línea fina para los objetos lejanos, y gruesa para los cercanos) o mediante el *código de color* (azul=infinito, verde=tras la pantalla, amarillo=sobre la pantalla, naranja=delante y lo más cercano). También se pueden añadir diseños del *set* (vistas lateral y desde arriba) u otros esquemas que definan con detalle cada *parallax*.

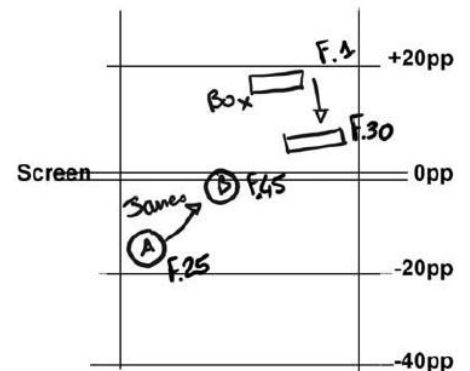
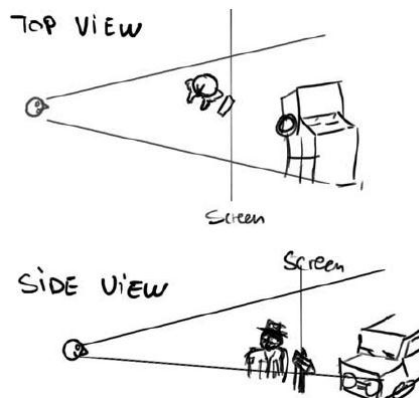


Fig. 2.4. Diferentes tipos de *storyboards* con profundidad.

2.2. Dirección de arte y fotografía

A la hora de componer los planos, se deben seguir ciertas reglas. Algunas decisiones típicas del arte y la fotografía convencionales se mantienen, pero otras varían al tener en cuenta las tres dimensiones. Por ejemplo, las composiciones recargadas y desordenadas que en 2D podrían resultar un problema, aportan en 3D claridad al generar mucha información de profundidad con los distintos planos. Por otro lado, las señales de profundidad basadas en movimiento se ven intensificadas en 3D. No hay normas fijas en el cambio de 2D a 3D, pero podemos destacar algunos aspectos concretos a tener en cuenta.

2.2.1. Composición de planos

En encuadres donde aparezca la cabeza de un actor en **primer plano**, es recomendable dejar aire por encima de esta, ya que si no la mostramos completa, la pantalla se percibe como si estuviera curvada.

Asimismo, en **planos medios** donde se podría ver el escorzo de otro personaje (típicos plano/contraplano), debe situarse éste enteramente en el plano, pues si se ve cortado dará problemas en el borde de la imagen (las disparidades son demasiado grandes).



Fig. 2.5. Reglas de composición de primeros y medios planos.

También hay que tener cuidado con los “**artefactos**” (objetos proyectados incorrectamente dentro de la sala, y que realmente tendrían que verse en otro plano) situándolos con un movimiento previo hacia fuera o uniéndolos con algún elemento al resto del espacio (por ejemplo, un brazo estirado).

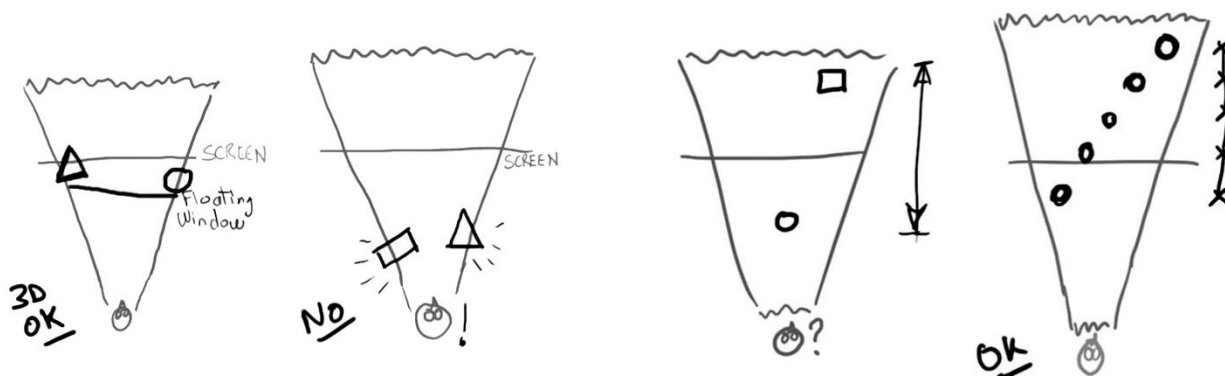
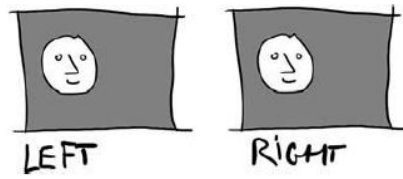


Fig. 2.6. Reglas de composición para evitar artefactos.

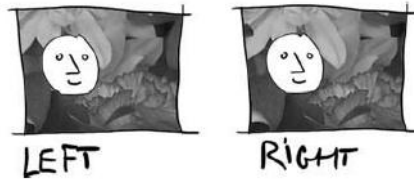
2.2.2. Otras consideraciones

Para una visualización cómoda, es aconsejable cumplir ciertos requisitos, que debemos conocer previamente para poder introducirlos en el rodaje y tener menos trabajo en la etapa de post-producción:

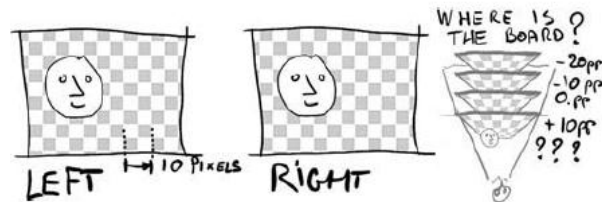
- Evitar grandes contrastes entre el fondo y el primer plano.
- Evitar postes o cuerdas que crucen el plano muy cerca de la cámara (común en 2D) pues para ser bien interpretados deben estar dentro del rango de fusión, o se pierde la profundidad.
- Usar patrones repetitivos sólo de componente vertical (*parallax* legible), pues los patrones horizontales no se aprecian bien (generan un *parallax* confuso, pues es el eje con el que creamos la profundidad).
- Usar texturas, que aportan profundidad, ya que los colores planos se aprecian como llanos (sin volumen).
- Los colores cálidos suelen avanzar hacia la audiencia, mientras los fríos se alejan al infinito.



Colores planos y patrones horizontales.
No textura = No parallax = No profundidad



Patrones aleatorios.
Textura = Parallax = Profundidad



Patrones repetitivos.
Confusión en la lectura de profundidad

Fig. 2.7. Consejos sobre los elementos del plano.

Teniendo en cuenta lo expuesto hasta el momento, puede completarse la etapa de preproducción del proyecto. Todo está preparado para comenzar a grabar.

3. GRABACIÓN ESTEREOSCÓPICA

El siguiente paso en la cadena de producción de una película es la toma de imágenes, rodaje o grabación. En este capítulo explicaremos todas sus características, así como los ajustes específicos que debemos tener en cuenta en la cámara, y haremos un repaso por los distintos formatos y tipos de cámaras.

3.1. Fundamentos de fotografía en 3D

La **fotografía estereoscópica** intenta reproducir la sensación de profundidad de la visión estereoscópica natural. Si obtenemos dos fotografías con una separación adecuada, correspondientes a la visión que se obtendría con cada ojo, y se observan con un visor apropiado, es posible recrear la sensación de profundidad. Para una película estereoscópica el proceso es el mismo, excepto que las fotografías pasan a ser secuencias de imágenes, que deben estar perfectamente sincronizadas tanto en la grabación como en la proyección.

Por tanto, para crear un video tridimensional, hay que producir **dos videos idénticos** con su punto de vista ligeramente desviado. Esto se consigue grabando con dos lentes una al lado de la otra y levemente separadas (dos cámaras o una sola diseñada para 3D), que deben ser idénticas y estar configuradas exactamente igual en tres sentidos:

1. Fotográficamente: parámetros iguales y en modo manual (balance de blancos, sensibilidad, apertura de diafragma, velocidad de exposición y profundidad de campo), ya que los ajustes automáticos dependen de cada cámara y no serán exactamente iguales. Además, la óptica debe mantener la distancia focal y el punto de enfoque iguales (por tanto, se debe usar el zoom sólo en sus valores extremos).
2. Cinematográficamente: velocidades de cuadro iguales, referencia temporal y movimientos sincronizados.
3. Geométricamente: una cámara se considera de referencia, mientras la otra se traslada ligera y lateralmente, con sus ejes ópticos formando un plano (el horizontal), y el cruce de sus ejes (punto de convergencia) a la distancia establecida.

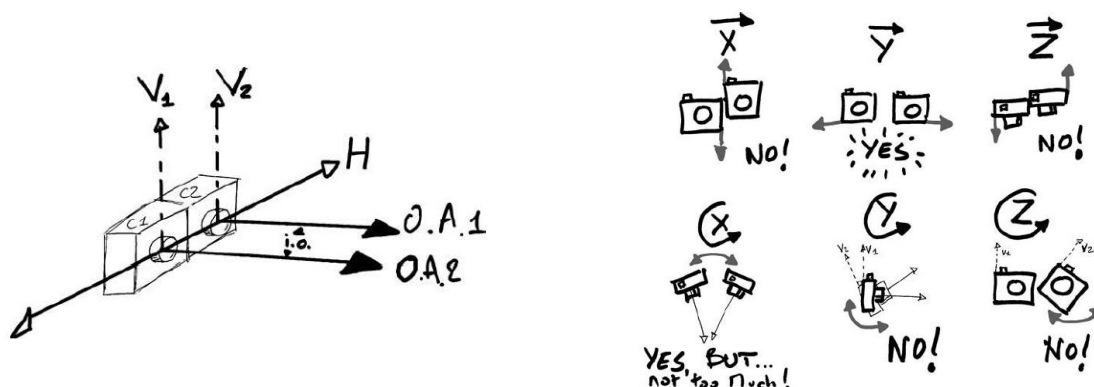


Fig. 3.1. Colocación de las cámaras según los 3 ejes.

Mendiburu [1] nos da muchas claves para conseguir captar un buen 3D. Para empezar, distingue entre dos tipos de **estilos cinematográficos**: representar la visión humana (guiando al público a ver lo que nosotros queremos) o representar el mundo en 3D (dejando libertad a la audiencia para que mire lo que quiera).

	Réplica de la visión humana	Réplica del mundo 3D
Desplazamiento en profundidad	Cámaras convergentes	Cámaras trasladadas
Enfoque	Con poca profundidad	Infinito (mucha profundidad)
Paréntesis de profundidad	Mayor que el rango de fusión	Limitado al rango de fusión
Continuidad 3D	Todo el tiempo, siempre en 3D	Sólo a veces, repartido según el guión
Ventana estereoscópica	Se rompe si es necesario	Se hace flotar si es necesario
Realismo de profundidad	3D orto-estereoscópico	Mundo a escala
Tamaño de pantalla preferido	Pantalla gigante, del estilo IMAX	Pantalla convencional de D-Cinema
Película típica	Películas científicas	Producciones comerciales (Hollywood)

Fig. 3.2. Tabla de diferencias entre los dos estilos cinematográficos.

3.1.1. Principales parámetros

El efecto de profundidad depende básicamente de la posición relativa de las cámaras y la situación del espectador. El primer factor corresponde a la grabación de las imágenes (que desarrollamos en este capítulo) y el segundo a su proyección (que explicaremos en el próximo). Por tanto, los dos parámetros a tener en cuenta ahora son:

- **Distancia interaxial:** es la distancia entre las dos lentes (equivalente a la distancia interocular en el caso de la visión humana). Se trata de la característica más importante, ya que genera el volumen global de la escena, y no se puede corregir en post-producción. Cuanto más separadas estén las lentes, más crecerá el volumen de la escena y el elemento que haya en primer plano. Por tanto, cuanto más cerca esté ese primer plano del fondo, más deberemos incrementar la distancia interaxial para obtener profundidad en la escena. Sus límites dependen de las lentes y las métricas establecidas.

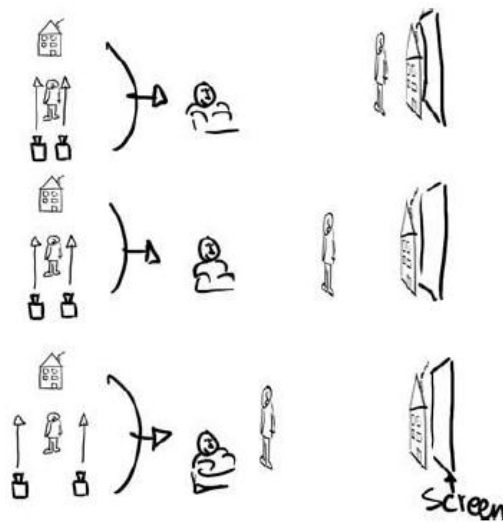


Fig. 3.3. Cambios de la percepción al variar la distancia interaxial.

- **Convergencia:** indica la colocación relativa de los ejes ópticos de las dos cámaras, y define el plano de la pantalla. Se trata de un parámetro importante, aunque no tan imprescindible al poder modificarse en post-producción. Según esto, podemos distinguir dos métodos: cámaras paralelas y cámaras convergentes.

En el caso de utilizar los ejes paralelos, la imagen 3D obtenida está situada 100% enfrente de la pantalla, sin superposición de objetos (aunque debe ser ligeramente recortada).

En el caso de utilizar los ejes convergentes, las lentes apuntan a un mismo punto formando un ángulo entre sí. Ese punto de convergencia no muestra disparidad estéreo y aparece justo sobre la pantalla, por tanto todos los objetos que aparezcan a la misma distancia que ese punto, serán apreciados sobre el mismo plano de la pantalla.

Es muy útil para grabar objetos pequeños y planos cortos, donde el gran tamaño de las cámaras hace imposible los ejes paralelos (pues cada cámara vería imágenes demasiado distintas para ser fusionadas correctamente). El problema es que el 3D queda limitado a la zona central de la imagen, perdiéndose en los bordes. Además, otro inconveniente es que podría apreciarse el efecto *keystoning*.

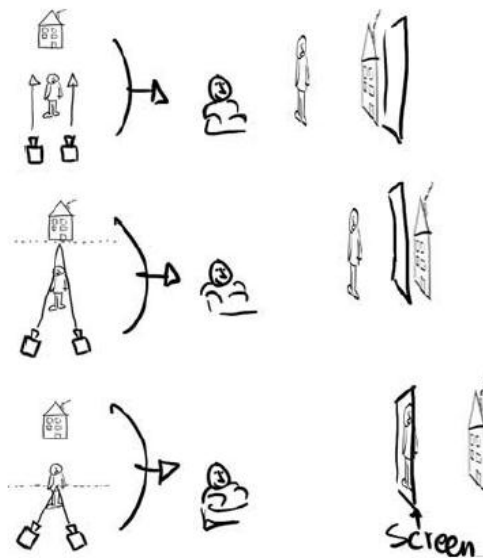


Fig. 3.4. Cambios de la percepción al variar la convergencia.

3.1.2. Lentes

El objetivo contiene el conjunto de lentes convergentes y divergentes, así como el sistema de enfoque y obturación, que forman parte de la óptica de una cámara tanto fotográfica como de vídeo. La configuración de estas lentes se basa en dos parámetros:

- **Distancia focal:** es la distancia entre el centro óptico de la lente y el foco (o punto focal) cuando enfocamos al infinito. Para una distancia focal fija, cuanto mayor sea la distancia interaxial, mayor será el ángulo entre los ejes ópticos, y más intenso se apreciará el efecto 3D. Si se incrementa la distancia focal (alejándose la cámara y haciendo zoom, de forma que el cuadro se mantiene igual), habrá que incrementar también la distancia interaxial para compensar.

- **Zoom:** es un objetivo de distancia focal variable, por lo que se puede variar el ángulo de visión, manteniendo el plano-imagen en el mismo sitio. En 3D se utilizan objetivos con zoom por la complejidad y pérdida de tiempo que supondría estar cambiando dos objetivos (que tendrían que volver a ajustarse exactamente iguales).

Esto conlleva un par de problemas: la progresividad del zoom (al girar el aro) no produce una ampliación lineal, y además varía según el objetivo, produciéndose disparidades verticales y “artefactos de convergencia” (habría que usar equipos corregidos por ordenador o arreglarlo en post-producción). Asimismo, el eje óptico del zoom tampoco se mantiene exactamente en el mismo punto al hacer zoom, produciendo el mismo problema, pero aún más complejo de corregir (habría que usar un soporte motorizado y controlado por ordenador que igualara los ejes a la otra cámara).

Por otro lado, en disparos con zoom limitado puede producirse el efecto de *vértigo*. Como al hacer zoom cambian los valores de *parallax* (alejándose el fondo), si alejamos la cámara, habrá que reducir la distancia interaxial para no salirse de la zona de confort.

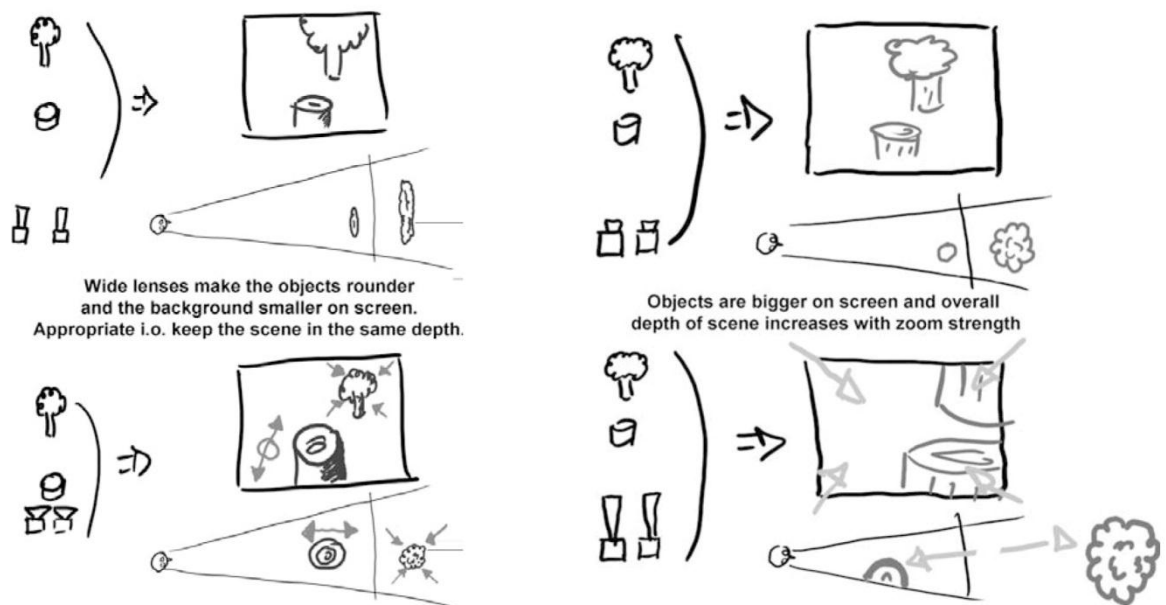


Fig. 3.5. Cambios de la percepción al variar la distancia focal y el zoom.

Por norma general, las lentes largas dan un 3D pobre, ya que separan al sujeto del fondo (que aparece borroso), incapaces de enfocar a ambos a la vez. En 3D, esto aplana al sujeto, produciendo un mundo plano compuesto por capas. Sin embargo, las lentes cortas dan un 3D estupendo, pues se mantienen más cantidad de planos enfocados, ayudando así a la percepción de profundidad.

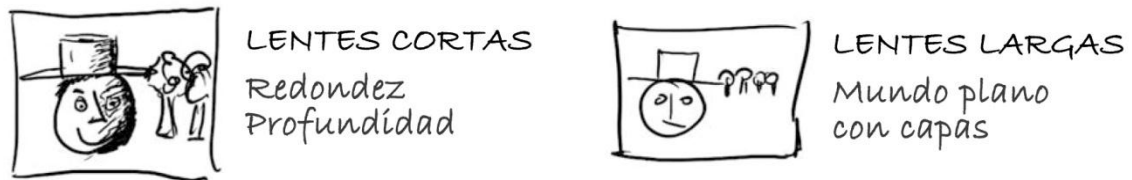


Fig. 3.6. Relación de las lentes con la profundidad.

3.1.3. Enfoque

El enfoque permite situar el punto más nítido de la imagen donde se desee. Los diferentes modos de llevar a cabo éste, también intervienen en la percepción del 3D:

- **Fondo fuera de foco:** El enfoque se centra en el elemento del primer plano. Esta es la situación a la que estamos acostumbrados, por tanto es la apropiada siempre que la audiencia no intente enfocar otra parte, en cuyo caso surgirán problemas. Otro inconveniente es que las texturas se pierden al estar borrosas, convirtiéndose en colores planos que, por tanto, eliminan la percepción de profundidad de esas partes.
- **Primer plano fuera de foco:** El enfoque está en un objeto más alejado que los primeros elementos que aparecen en la imagen. Esta situación es menos probable en la vida real, porque solemos excluir esos objetos espontáneamente. Se puede corregir en post-producción, pero en todo caso es preferible no introducir objetos en esos primeros planos (como dijimos en el apartado 2.2.1 *Composición de planos*).
- **Desenfoque de movimiento:** El desenfoque en el movimiento horizontal afecta negativamente a la profundidad, ya que, al estar borroso, se pierden las disparidades horizontales que nos indican el *parallax* y aportan la sensación de profundidad. De esta forma, se aprecia como plano.

3.1.4. Iluminación

La luz resulta fundamental en la fotografía y especialmente en la grabación 3D. La iluminación consiste en dirigir la luz hacia un objeto con la intención de que pueda ser registrada por la película o sensor electrónico de la cámara. Además, posee una función estética y expresiva que confiere un significado a la imagen. Podemos distinguir dos características básicas:

- **Cantidad de luz:** Se necesita conseguir mucha luz por varias razones: lograr un enfoque lo más infinito posible (para la nitidez del mayor número de objetos al mismo tiempo), compensar la pérdida que introduce el semi-espejo divisor de haz (elemento de la cámara que divide la cantidad de luz hacia cada lente), e iluminar más las zonas de sombra (pues si son demasiado oscuras, aparecerán como un color plano y por tanto sin ninguna profundidad).
- **Situación de la luz:** Es importante situar la luz dentro de la zona de confort, suavizando la iluminación en el fondo y en el primer plano, pues los altos contrastes pueden suponer pérdidas de un ojo a otro que generan “artefactos” en su visualización. Esto no sucede en el plano de la pantalla, pues sobre ella ambas imágenes coinciden perfectamente, y por tanto se puede despreocupar más la iluminación en esa zona. Es decir, cuantas más disparidades haya en las imágenes, más suaves deberán ser las sombras. Por otro lado, la luz debe ser baja en los bordes laterales, pues son áreas conflictivas por la rivalidad retinal (comentada en el apartado *1.1.3 Problemas con la estereoscopia*).

A partir de todos estos parámetros que configuramos en la grabación, vamos obteniendo unos resultados diferentes en la futura proyección de esas imágenes, en la que nos centraremos en el próximo capítulo. Como hemos visto, algunos son factores fijos (como la cámara, la localización de la escena grabada o la pantalla de proyección), otros típicos del cine convencional (como la posición de la cámara o las lentes de esta), y en los que más nos fijamos son exclusivos del 3D (la distancia interaxial y la convergencia).

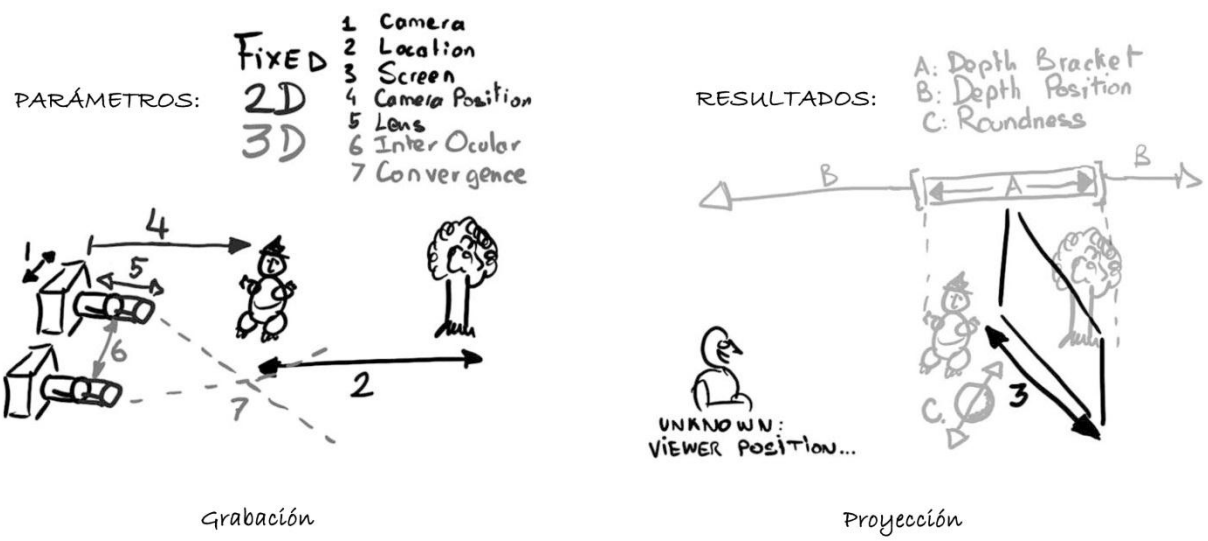


Fig. 3.7. Parámetros que intervienen en la grabación y los resultados que producen en la proyección.

3.2. Ajustes de la cámara

Para encajar el mundo real dentro del espacio 3D, partimos de tres de los parámetros ópticos vistos: la distancia interaxial, la convergencia y la distancia focal, en relación con la distancia al sujeto.

3.2.1. Configuración empírica

La configuración de la cámara y la escena debe probarse sobre la localización del rodaje. Antes de comenzar a grabar, podrían seguirse las siguientes fases:

- **Ajuste inicial:** Se siguen los pasos habituales de cualquier grabación en 2D: composición de la imagen, elección de la lente y posición de la cámara. Después se aplican los parámetros de 3D: distancia interaxial para el *parallax* requerido por el guión o el presupuesto de profundidad, que define el paréntesis de profundidad.
- **La regla del 1/30:** Según esta regla, la distancia mínima entre la cámara y el primer plano (donde se encuentra el punto de convergencia) será 30 veces la distancia interaxial. Esto no es estrictamente aplicable, pues se debe adaptar al tamaño de la pantalla (si es de gran tamaño se pueden llegar a aplicar valores como 1/50 o 1/100), pero es un primer paso para elegir el montaje de cámaras requerido.

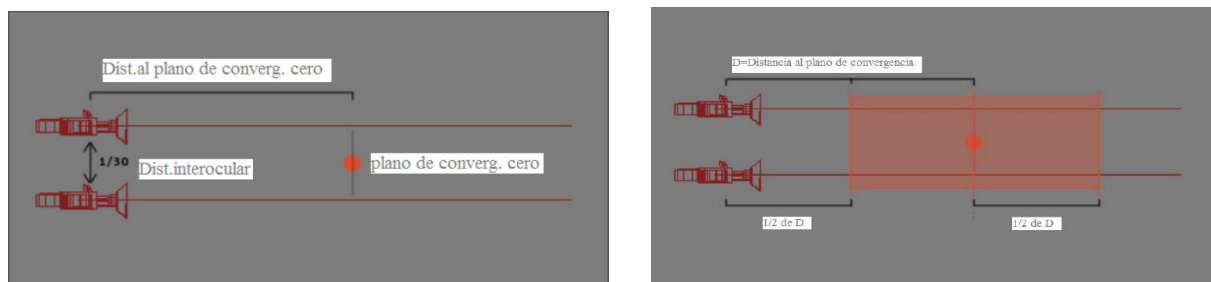


Fig. 3.8. Colocación de cámaras y escena según la regla del 1/30.

El técnico de imagen César Rubio [14] aporta en un artículo sus experiencias prácticas con esta regla. Para planos generales, usa lentes de 30 mm, alejándose al menos 3 m del sujeto para obtener una visión de cuerpo entero, por lo que la distancia interaxial

correspondía a 10 cm ($3 \text{ m} / 30 = 0,1 \text{ m}$). Para planos medios, usa lentes normales (16 mm) y una configuración orto-estereoscópica (65 mm entre lentes), por lo que el sujeto debe situarse a 1,95 m de la cámara ($0,065 \text{ m} \times 30 = 1,95 \text{ m}$). Para primeros planos, usa lentes de 25 mm, colocándose cerca del sujeto (a 1 m) con una distancia interaxial de 33 mm.

- **Evaluación visual del 3D:** Se visualizan las imágenes en un monitor 3D para corregir posibles valores de *parallax* fuera del paréntesis de profundidad. Además de la valoración subjetiva, utilizamos el *factor de redondez* de los objetos, que es la diferencia entre un objeto mirado con un ojo y con los dos. Este parámetro está comprendido entre 0 y 1, siendo un valor bajo si los objetos se aprecian demasiado planos y viceversa. A partir de este análisis, podemos perfeccionar el efecto 3D según nos convenga.

Factor de redondez	Efecto	Corrección
>1	Volúmenes exagerados	Reducir la distancia interaxial Usar lentes más largas Mover la cámara hacia atrás
1	Modelo orto-estereoscópico	No necesaria
0'7 a 1	Muy parecido al modelo orto-estereoscópico	No necesaria
0'5 a 0'7	Ligero aplanado de los objetos	Incrementar la distancia interaxial Usar lentes más cortas Mover la cámara hacia delante
0'3 a 0'5	Notable aplanado de los objetos	Cambiar la composición de la escena Usar mejor los efectos del rig dual
0 a 0'3	Película plana o con visibles capas sobrepuestas	Cambiar la composición de la escena Usar los efectos del rig dual

Fig. 3.9. Tabla de valores del factor de redondez, los efectos que produce y sus posibles correcciones.

3.2.2. Animación del efecto 3D

La configuración de las cámaras puede animarse, es decir, modificar sus parámetros a lo largo del tiempo de manera automática (y a la misma velocidad que el movimiento de cámara), para conseguir una compenetración total.

- **Animar la convergencia:** Se cambia la escena a lo largo del eje Z. En una producción 3D en directo (eventos o documentales) hay un encargado de la convergencia (como sería el foquista del foco). En una película, sin embargo, se suele grabar con los ejes paralelos y modificar la convergencia en la post-producción.
- **Animar la distancia interaxial:** Se utiliza para crear efectos artísticos de agrandar objetos, pues al aumentarla, se acentúa el efecto de profundidad. Debe estar muy bien sincronizado.

3.2.3. Almacenamiento

Al grabar se emparejan los sistemas en el modo esclavo-amor, haciendo que una de las cámaras reciba órdenes de la otra. Pero esto no garantiza que se cumpla siempre a la vez, se pueden obtener imágenes perfectamente sincronizadas con un fotograma de retraso que podría estropear todo el proceso. Por ello, contamos con cierta información adicional:

- **Señal de Genlock:** Se usa una referencia de video específica para sincronizar todas las fuentes de vídeo de las que se disponga. La solución más sencilla y barata usa un protocolo LANC para controlar los relojes internos de las dos cámaras y mantenerlas en sincronía por un largo periodo de tiempo, así como controlar el zoom. En el mundo profesional, cada cámara es un equipo multi-cámara en sí mismo, que debe estar sincronizado y en fase, usando incluso coordinación en la precisión de los píxeles en cámaras digitales.
- **Metadata:** Se genera y archiva con toda la información adicional. Sus características vienen especificadas por el grupo ASC (*American Society of Cinematographers*).

El almacenamiento de toda esta información varía según cámaras y formatos. Antes se grababa en películas analógicas como secuencias independientes, mientras que ahora se suele almacenar directamente en discos duros.

3.3. Tipos de cámaras

Para obtener secuencias tridimensionales se pueden emplear muy diversos procedimientos. Puede usarse una cámara convencional con configuraciones o accesorios especiales, dos cámaras independientes disparadas de forma sincronizada, o una cámara estéreo especializada.

3.3.1. Grabación con una sola lente

En determinadas circunstancias, se puede conseguir el efecto 3D con una sola cámara convencional, mediante un control preciso de la grabación para generar el *parallax*. Es el caso más simple y accesible para cualquiera.

- **Misma secuencia con un cambio temporal:** Si se está moviendo la cámara a lo largo de un eje, se puede extraer el 3D desde un único punto de vista con un simple retraso para el segundo ojo (explicado en el apartado 4.2.11 *Efecto Pulfrich*). Si el objeto está girando sobre su eje vertical (o si la cámara está girando alrededor de él) se estará disparando en modo convergente, mientras que si el objeto (o la cámara) se mueve de forma lineal, el disparo será en paralelo. La ventaja principal, junto con su bajo coste y simplicidad, es la capacidad para cambiar la distancia interaxial simplemente desplazando el segundo ojo un fotograma antes o después. Su inconveniente obvio es que sólo es válido en imágenes con movimiento.
- **Doble pase sobre una escena estática:** Se graban las dos imágenes en dos tiempos distintos consecutivos, desplazando la cámara la segunda vez una distancia horizontal determinada (que corresponderá a la interaxial). Esto se puede aplicar sólo cuando se trate de objetos inmóviles o modelos a escala, pues un sujeto nunca se moverá o actuará exactamente de la misma manera dos veces. Para llevarlo a cabo, no basta con mover el punto de referencia y replicar los movimientos, sino que se debe animar el *rig* virtual, es decir, que debe tener un punto de giro equidistante de las posiciones de las dos cámaras.

3.3.2. Cámaras 3D a partir de cámaras 2D

Para los demás casos, es necesario tener dos lentes para conseguir el efecto tridimensional. De manera tanto profesional como *amateur*, esto se puede conseguir a partir de una pareja de cámaras normales o accesorios que lo emulen, manteniendo la distancia interaxial requerida entre ellas.

- **Pareja de cámaras 2D:** La idea más sencilla es utilizar una pareja de cámaras normales. Puede estar compuesto por un par de cabezas, dos MAC minis y discos duros, dando como resultado un sistema muy manejable. Cada cámara graba la secuencia independientemente (sincronizadas y con los mismos ajustes, como hemos visto en apartados anteriores) y es en post-producción donde se genera el 3D.
- **Accesorios ópticos 3D:** Se trata de una óptica estereoscópica montada en una cámara monoscópica. Se coloca delante de la lente y combina las vistas izquierda y derecha en un solo cuadro que es grabado como 2D, en una sola secuencia. No genera problemas de sincronización ni de volumen, pero tiene inconvenientes como una distancia interaxial siempre fija y una reducción apreciable de la resolución.



Fig. 3.10. Conjuntos de dos cámaras unidas.

3.3.3. Cámaras 3D con ajuste interaxial

Las cámaras reales de 3D incorporan el montaje mecánico, las dos lentes, un sistema de sincronización y a veces algún dispositivo óptico adicional. Denominamos “*rigs*” a estas plataformas de 3D que mantienen el conjunto, permiten el desplazamiento lateral dinámico y posibilitan el ajuste de la convergencia. Hay básicamente dos tipos:

- **Rig paralelo:** Es el montaje más simple. Las dos cámaras están montadas una al lado de la otra, con robustez mecánica para que no puedan rotar por su propio peso. Es recomendable para grabar a grandes distancias, como paisajes. Sus principales ventajas son su reducido tamaño y bajo coste. Su inconveniente es que la distancia interaxial mínima está limitada por la anchura de las cámaras.



Fig. 3.11. *Rig* paralelo.

- **Rig divisor de haz:** Obtiene mejor efecto 3D, ya que posibilita el acercamiento a los objetos disminuyendo la distancia interaxial todo lo que sea necesario (incluso a cero). Este montaje usa un espejo semi-reflectante que divide el haz de luz entre las dos cámaras, colocadas formando un ángulo de 90° entre sí. Dicho espejo permite un 50% de reflexión y un 50% de transmisión. Cada lente forma 45° con el espejo, grabando una a través de él y la otra la imagen reflejada.

El montaje hacia abajo, con la cámara vertical por encima del espejo, es adecuado para ángulos bajos. El montaje hacia arriba, con la cámara vertical situada bajo el espejo, es mejor para combatir la suciedad por polvo. Los mayores inconvenientes de este *rig* son su complejidad y fragilidad. Permite una separación variable entre los objetivos, pero no lentes gran angular (de amplio campo de visión). Además, el espejo debe ser bastante grande para abarcar todos los ángulos, y mantenerse muy limpio y rígido para no crear artefactos por el efecto *keystoning*, lo que conlleva aumentar el peso del *rig*, limitando su acceso.



Fig. 3.12. *Rig* de haz divisor.

3.4. Formatos y sistemas de grabación

Existen dos procedimientos para grabar la información en el formato estereoscópico: la obtención de dos secuencias de video separadas o la obtención de una secuencia de video que contiene ambas codificadas. En el primer caso, se trata de dos cámaras independientes sincronizadas entre sí. El segundo caso, el más común, es el utilizado por las cámaras estereoscópicas. Además, existen dispositivos que permiten obtener esa secuencia 3D directamente a partir de un adaptador y una cámara convencional (cómodo pero con menor calidad), o con dos cámaras y un multiplexor.

3.4.1. Formato analógico

Desde 1892 y hasta hace muy poco tiempo, el cine siempre ha estado ligado a las **bobinas de película**. La técnica consiste en plasmar las imágenes sobre una película fotográfica, que genera una imagen en negativo producto de una reacción química. Se reproduce a 24 fotogramas por segundo, ofreciendo así una gran calidad de imagen y movimiento. Además, incluye una línea de audio que se imprime junto a los fotogramas. El uso de este tipo de películas para grabación es costoso, pero ofrece gran calidad en la captura y reproducción.

El formato más habitual es el de **35 mm** (medida de la diagonal del fotograma). Cuando se desea una mayor resolución (alta definición) se usa el de **70 mm**, que usa unos fotogramas de 65 mm para la imagen y los restantes para almacenar en una banda magnética los canales de audio.

Otro detalle interesante es el número de perforaciones que se toma como referencia. Las perforaciones son el elemento fundamental para el arrastre de la película a través de cámaras, máquinas de procesado, proyectores y, en general, de todos los mecanismos que intervienen en la fabricación y uso de las películas cinematográficas. Al estar presentes en cualquier movimiento que se introduzca en ella, se han convertido en un elemento regulador de la sincronización entre imagen y sonido. Los fotogramas pueden ir colocados en horizontal o vertical a lo largo de la tira. En 35 mm se emplean fotogramas que ocupan 4 o 8 perforaciones. Por ejemplo, en el sistema *VistaVision* la película de 35 mm desfila horizontalmente y el fotograma ocupa 8 perforaciones (similar a la fotografía estándar). Sin

embargo, en 65 mm y con desfile vertical, el número de perforaciones puede variar entre 5, 8, 10 o 15. De esta manera podemos hablar de formatos 4/35, 15/70, etc. El formato más común en cine es **5/70**, mientras que las 15 perforaciones se reservan para pantallas gigantes y alta definición.

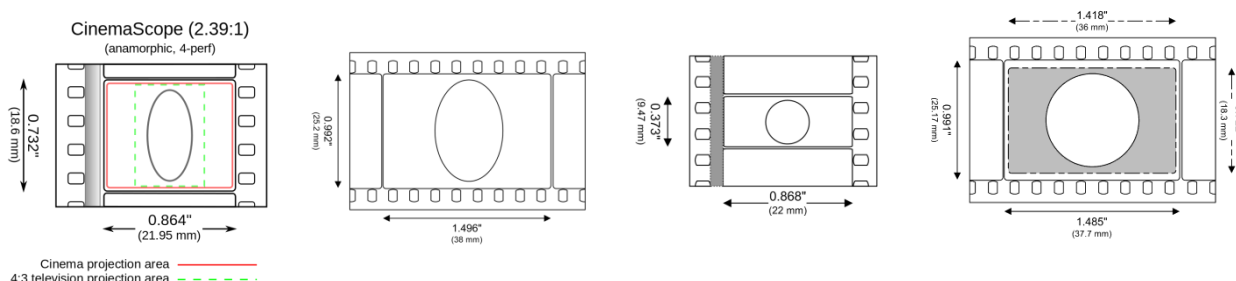


Fig. 3.13. Fotogramas de los formatos *CinemaScope*, *Technirama*, *Techniscope* y *VistaVision*.

3.4.2. Sistemas de grabación analógica

Como hemos dicho antes, dentro de los sistemas analógicos podemos encontrar dos tipos: los que graban ambas secuencias de imágenes en una sola película y los que utilizan dos.

Con **una sola película**, el más importante fue *SpaceVision*. Grababa en una película estándar de 35 mm y 2 perforaciones por cada fotograma. Para la captura se superponían las dos imágenes (imagen derecha encima de la izquierda) mediante el dispositivo óptico *Trioptiscope*, usando la mitad del fotograma para cada toma. Pero aunque la relación de aspecto es de 2'35:1, la imagen resultante no tenía buena calidad debido al pequeño tamaño del fotograma. Además, la utilización de filtros reducía considerablemente la luminosidad y no ha tenido éxito. Otros sistemas similares que filman utilizando una única película son *Optimax III*, *StereoVision* o *3-Depix*.

El resto de los sistemas analógicos graban en **dos películas** separadas. Podemos mencionar tres sistemas que destacan entre los múltiples que hay:

- ***StereoSpace*:** Usa dos cámaras de 65 mm sincronizadas, situadas formando un *rig* divisor de haz, que posteriormente se pasan a 70 mm (con las pistas sonoras). Es el sistema de las películas 3D de *Disneyworld*, y aunque no se ha usado mucho, llevó al desarrollo del ***Disney-Kodak 70mm 3D***.

- **StereoCam:** Es una versión mejorada del sistema anterior, muy versátil, ya que admite películas de 35mm, 65mm, e incluso vídeo digital, por lo que está muy extendido. De nuevo se basa en el *rig* divisor de haz, y además permite un gran control de imagen (ajustes de la distancia interaxial y de la convergencia).
- **IMAX 3D:** La grabación se realiza en dos películas de 65 mm (15/70 de desfile horizontal). Emplean dos métodos de filmación: el *rig* de haz divisor o la cámara especial *Solido Camera*, compuesta por dos objetivos separados 64 mm y que permite el uso de objetivos de diferentes longitudes focales (incluso un súper gran angular). Este diseño más compacto permite filmar en situaciones en las que no sería posible hacerlo con la disposición de doble cámara, por ejemplo en escenas submarinas.

3.4.3. Formato digital

El cine cada vez está aceptando más las fórmulas digitales, que se han desarrollado y extendido a un ritmo vertiginoso. Los métodos de almacenamiento más comunes para alta definición son las **tarjetas de memoria** (SD HD) o los **discos duros** (HDD).

Existen básicamente dos formatos considerados **alta definición** (HD), que proceden de los usados para la HDTV: el HD Ready (1280 x 720 píxeles) y el Full HD (1920 x 1080 píxeles). Además, en los últimos años ha aparecido la **super-alta definición** (UltraHD) con formatos como el 4K y el 8K.

José Luis Tamez reúne todos estos formatos en un interesante artículo [16], donde explica que estas resoluciones partían del tipo de cinta en la que se grababa, ya que ésta solía escanearse generando la copia digital para post-producción. Se usa la referencia “nK”, donde la “n” se multiplica por 1024 para dar la resolución horizontal. Por ejemplo, **2K** son 2048 x1536 píxeles (aunque puede variar según formatos, siendo 2048 x1556 en *FullAperture* o 2048 x 872 en *Cinemascope*), mientras que **4K** son 4096 x 3072 píxeles. Sin embargo, en televisión los estándares permanecen en 16:9 panorámico y son múltiplos del formato FullHD, por lo que 2K es 2048 x 1152, 4K es 3840 x 2160 píxeles y **8K** son 7680 x 4320.

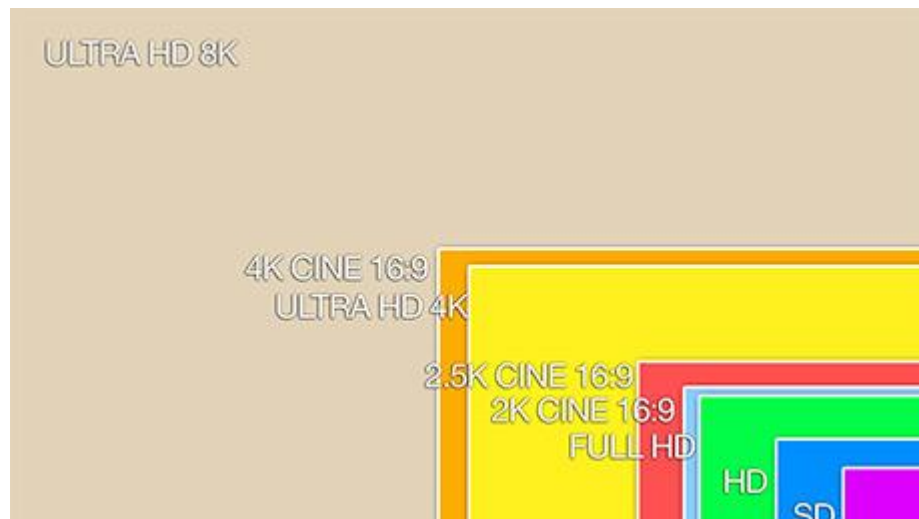


Fig. 3.14. Relación de resoluciones de alta y super-alta definición.

En el ámbito doméstico o semi-profesional, el formato de grabación que utilizan la mayoría de videocámaras es el **AVCHD** (*Advanced Video Codec for High Definition*) que utiliza la tecnología de compresión más avanzada para reducir el gran tamaño de los archivos de vídeo HD (1920x1080), sin deteriorar la calidad de imagen. Permite grabar horas por su menor tamaño de archivos.

AVCHD hi-def camcorder format tech specs				
Recording Media		8cm		
Laser wavelength		650nm		
VIDEO	Video Signal	1080/60i	720/60p	480/60i
		1080/50i	720/50p	576/50i
		1080/24p	720/24p	
	Number of Pixels (Horizontal x Vertical)	1920x1080	1280 x 720	720 x 480
		1440x1080		720 x 576
	Aspect Ratio	16:9	16:9	4:3, 16:9
	Compression Method	MPEG-4 AVC/H.264		
	Sampling Frequency for Luminance Signal	74.25MHz	74.25MHz	13.5MHz
		55.7MHz		13.5MHz
	Sampling Format	4:2:0		
	Quantization Bit-rate	8-bit (Luminance/Chrominance)		
AUDIO	Compression Method	Dolby Digital (AC-3)		Linear PCM
	Bit Rate after Compression	64 - 640 kbps		1.5Mbps (2-channel)
	Audio Mode	1 - 5.1 channel		1 - 7.1 channel
System		MPEG-2 Transport Stream		
System Bit Rate		up to 18Mbps		

Fig. 3.15. Especificaciones técnicas del formato AVCHD.

3.4.4. Sistemas de grabación digital

Cada vez aparecen más cámaras estereoscópicas nuevas en el mercado, que van mejorando y renovándose constantemente, de forma que es imposible abarcarlas todas. Por ello, mencionaremos sólo las compañías más significativas, con algunos de sus modelos comerciales.

- ***Pace's Fusion***: unión de James Cameron y el director de fotografía Vince Pace para crear una cámara HD3D. Primero desarrollaron la



Reality Camera System (RCS-1), que se componía de dos bloques CCD *Sony T950* modificados para reducir su anchura a menos de 70 mm, con óptica de *Fujinon* y *Panavision*, convergencia variable y tan ligera que podía llevarse sobre el hombro. Su segundo modelo RCS-2, basado en el sistema de semi-espejo para reducir la distancia interaxial, se perfeccionó y pasó a llamarse **Fusion**, empleándose en la mayor parte de las producciones cinematográficas estereoscópicas. A partir de este, se han desarrollado versiones basadas en las cámaras *Sony 1500*, *Sony F23* y *Red One*.

- ***3Ality Digital***: compañía liderada por Steve Schklair y líder histórica en *rigs* divisores de haz HD3D. Fue la primera en mostrar una *F900*



controlada por tres ejes con control electrónico de las disparidades, la distancia interaxial y la convergencia. Se ha demostrado, además, su capacidad de intercambio a través de enlaces de satélite.

- ***Paradise FX***: compañía fundada por Tim Thomas y Max Penner, que ha pasado de grabar en 35 mm a 65 mm, y finalmente a 2K y 4K digital. También han desarrollado sistemas de mano *SI2k*, cabezas *RED*, *steadycams* y equipos para grabar bajo el agua.



Otras compañías que compiten con sus cámaras HD3D son las americanas *3 Dimension Films* o *21st Century 3D*, la canadiense *Lightspeed Design*, la alemana *P+S Technik*, o la francesa *Binocle*.

En el ámbito doméstico, también encontramos multitud de compañías desarrollando videocámaras HD3D, donde podríamos destacar **Panasonic** (con modelos como *HDC-Z10000*, *HC-V720* o *HC-X900*) y **Sony** (con sus cámaras *Bloggie 3D* o *TD10 Handycam*).

4. PROYECCIÓN ESTEREOSCÓPICA

Una vez que la película está grabada, pasa por una etapa de post-producción y procesado (que veremos en el próximo capítulo) que la prepara para poder visionarse en 3D. Para entender los procedimientos que se aplican a la imagen, es necesario conocer previamente cómo será proyectada. En este capítulo explicaremos cómo se percibe el efecto tridimensional por los espectadores, los diferentes métodos de visualización que pueden utilizarse y los sistemas de proyección más importantes.

4.1. Percepción en la sala

La sensación que produce en el público la imagen 3D está fuertemente relacionada con la sala donde es proyectada. Esta percepción depende sobre todo de dos importantes factores: la posición donde nos coloquemos dentro de la sala y la disposición de los elementos visionados en la pantalla. Todo esto lo desarrolla Mendiburu [1] de manera clara, separando cada efecto y obteniendo la zona donde la visión es adecuada.

4.1.1. Colocación del espectador

A la hora de percibir la profundidad, es importante el lugar donde esté situado el espectador en relación a la pantalla. Conociendo los distintos efectos que se producen en el visionado, se podrá elegir adecuadamente la situación de los asientos en una sala.

- **Efecto de la distancia a la pantalla:** La profundidad de una imagen 3D situada en la parte frontal de la pantalla, aumenta con la distancia a esta, pero sólo a lo largo del eje Z. Al alejarse el espectador de la pantalla, aprecia como si todo lo que hay en el espacio comprendido entre ellos se estirara.

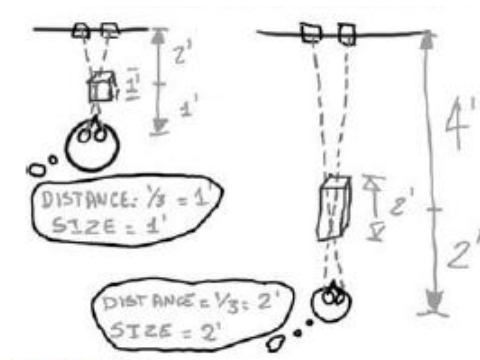


Fig. 4.1. Efecto de la distancia a la pantalla.

- **Efecto de fuera del eje:** En los laterales de las salas nunca es cómodo ver una película, por la deformación del 2D. En el caso del 3D, esta deformación es aún mayor y por tanto molesta para la vista, pues los objetos se “estiran” de una manera oblicua poco natural.

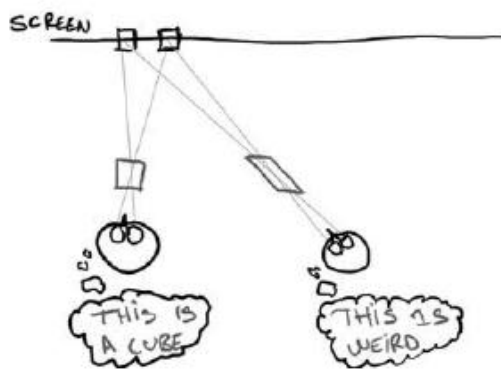


Fig. 4.2. Efecto de fuera del eje.

- **Efecto del tamaño de la pantalla:** Aunque no depende de la situación del espectador en sí misma, también es importante tener en cuenta que la profundidad de una imagen 3D se incrementa linealmente con su tamaño 2D. Es decir, cuanto más grande sea la pantalla, mayor será el efecto estereoscópico. Esto supone un riesgo de *parallax* divergente en las pantallas grandes.

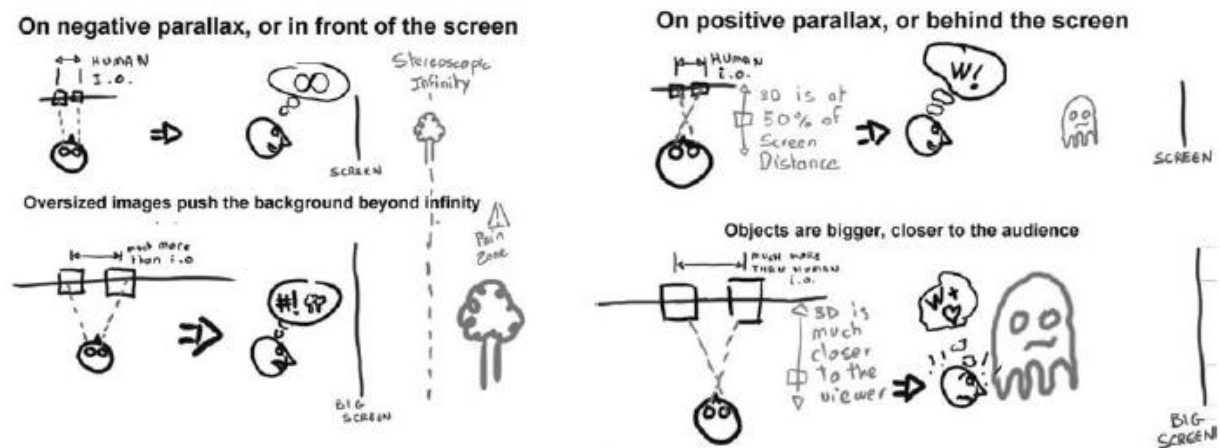


Fig. 4.3. Efecto del tamaño de la pantalla.

Teniendo en cuenta estos dos factores, el lugar más cómodo será la última fila, ya que la acción sucede lejos. Según avanzamos hacia las primeras filas, cada vez es más intenso para nuestro sistema visual, porque la acción sucede muy cerca. Los asientos laterales, sobre todo en el primer tercio de la sala, deben evitarse.

4.1.2. Ventana estereoscópica

En una película 2D, se mira a objetos planos definidos por los límites de la pantalla. Sin embargo, en una película 3D, los objetos están flotando sobre un espacio definido por la posición relativa de los márgenes de la pantalla y los ojos, como a través de una ventana.

Cuando un objeto se sitúa incorrectamente en relación con dicha ventana estereoscópica, se pueden producir “violaciones” que generan incoherencias entre las imágenes derecha e izquierda:

- **Romper la ventana estereoscópica:** Cuando un objeto se acerca mucho a la audiencia (saliendo de la pantalla) por un lateral, los ojos verán dos perspectivas demasiado distintas. En este caso, la oclusión es más fuerte que el *parallax*, por lo que el cerebro decide poner el objeto detrás de la pantalla. Este error se debe evitar, y sólo es

admisible si el objeto se mueve muy rápidamente entrando o saliendo de la pantalla.

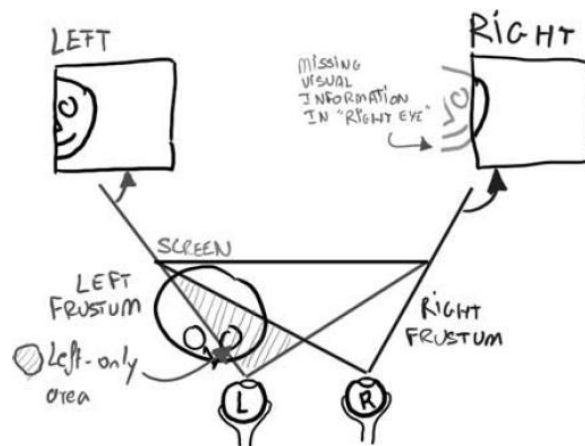


Fig. 4.4. Efecto de ruptura de la ventana estereoscópica.

- **Doblar la ventana estereoscópica:** Cuando un objeto se sale por los bordes de arriba y abajo pero no interfiere en los laterales, el cerebro interpreta que la pantalla está curvada hacia la audiencia. Por tanto, debe evitarse siempre cortar por arriba los rostros u objetos en primer plano.

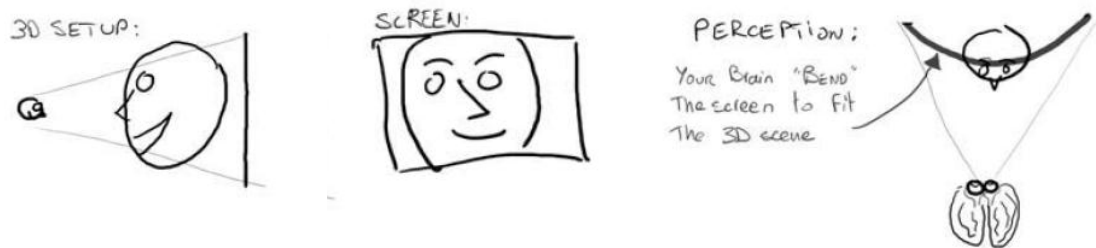


Fig. 4.5. Efecto de flexión de la ventana estereoscópica.

- **Hacer flotar la ventana estereoscópica:** Como respetar siempre los límites de la pantalla es muy difícil, en ocasiones se pueden utilizar máscaras en los laterales de las imágenes para ocultar los objetos indeseables. Esto lo explicaremos en el apartado 5.4.2 *Graduación de profundidad*.

4.1.3. Espacio de la pantalla

A partir de las diferentes reglas de percepción del 3D explicadas, se obtiene un esquema aproximado con todas las áreas de visión que pueden distinguirse y dónde debería situarse la **zona de confort**:

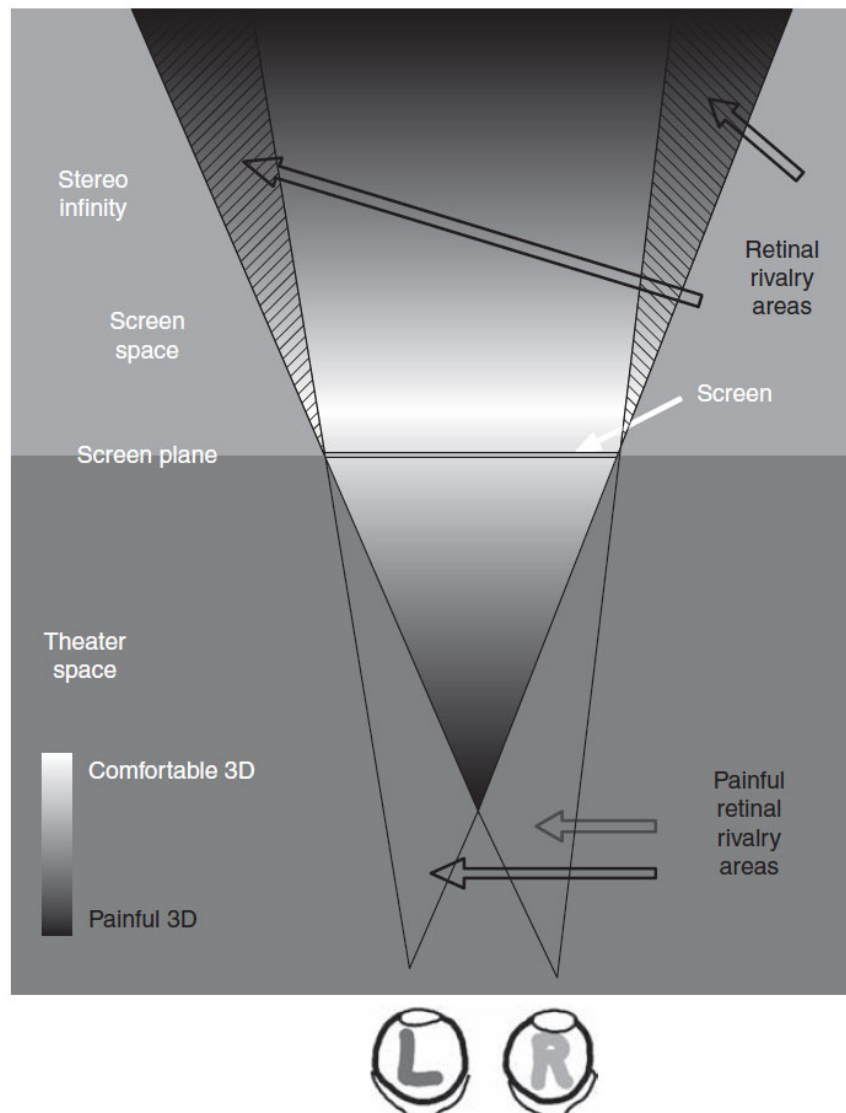


Fig. 4.6. Zona de confort de la percepción estereoscópica.

En dicho gráfico, el área de visión estereoscópica viene expresada en forma de gradiente de blanco a negro. La zona de confort, de blanco a gris oscuro, puede ser utilizada libremente. La zona de gris oscuro a negro es donde la convergencia o divergencia excesiva molestará a la vista, y debe usarse sólo en periodos de tiempo limitados e intercalados. Las zonas ralladas pueden verse con un solo ojo y generan rivalidad retinal, por lo que deben

utilizarse con precaución. En los triángulos grises planos que hay delante de los ojos, los objetos sólo podrán moverse rápido entrando o saliendo del plano. Y el resto de las zonas son invisibles para el espectador.

Tenemos que meter todo un mundo (desde la cámara hasta el infinito) dentro de la zona de confort (desde unos 20 m delante de la pantalla hasta unos 20 m por detrás de ésta). Esto se consigue controlando la posición relativa de las cámaras y en post-producción, con tomas que respeten las leyes expuestas.

4.2. Sistemas de visualización estereoscópica

Hay numerosos y variados métodos para visualizar un proyecto en 3D. Para poder observar correctamente una imagen estereoscópica, cada ojo debe ver solamente la imagen que le corresponde, izquierda o derecha. Con ese fin se han ideado los diferentes sistemas (recopilados en algunos estudios [23]) que se explican a continuación.

4.2.1. Visión libre paralela

Es el método más evidente y el primero que apareció, pues consiste simplemente en colocar una imagen al lado de la otra y mirar la derecha con el ojo derecho y la izquierda con el ojo izquierdo. Así se mantienen los ejes ópticos paralelos, como mirando al infinito. Para conseguirlo, las imágenes no pueden estar separadas más de la distancia interocular (65 mm) ya que no sería posible hacer divergir tanto el enfoque. Debido a esta limitación se inventó el estereoscopio, un dispositivo que limita la línea de visión de cada ojo y bloquea la adyacente. El cerebro se encarga de formar la composición tridimensional en el medio de las dos.

Los primeros modelos eran similares a los de la fotografía: disponían de un soporte (de madera o metal) donde colocar las láminas con las imágenes a visionar, y empezaron a incluir espejos para poder ver imágenes más grandes o más pequeñas. Este sistema se utiliza también para ver los estereogramas de puntos aleatorios de los libros (*ojo mágico*) y en campos como la medicina o la cartografía.



Fig. 4.7. Esquema de la visión libre paralela y uno de los primeros estereogramas.

4.2.2. Visión libre cruzada

De forma similar al método anterior, este método consiste en colocar las imágenes al lado pero en orden inverso, de manera que con el ojo derecho se vea la imagen izquierda y con el ojo izquierdo se vea la imagen derecha. De esta forma, se cruzan los ejes ópticos y los centros de las imágenes pueden estar separados más de la distancia interocular.

Se hizo muy popular en revistas o Internet, ya que permite una visualización a simple vista de imágenes de diversos tamaños, pero provoca cansancio al obligar a los ojos a realizar un enfoque tan cercano.

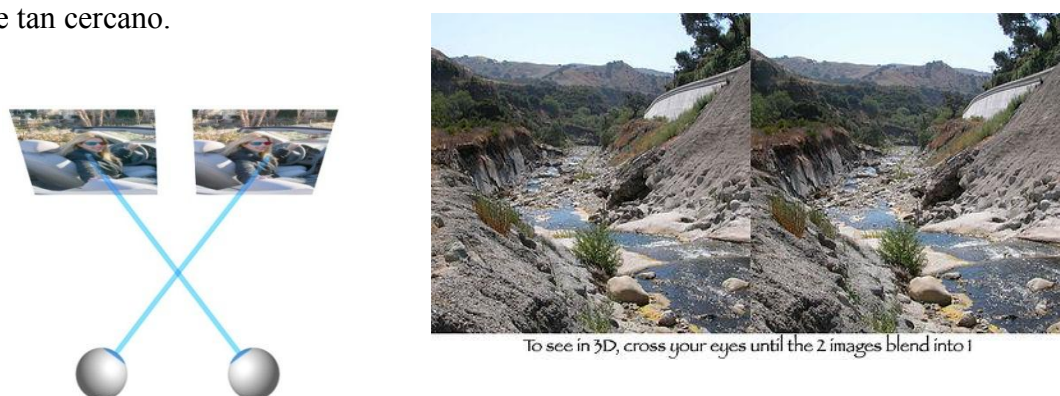


Fig. 4.8. Esquema de la visión libre cruzada y un estereograma.

4.2.3. Anáglifo

Se basa en el fenómeno de síntesis de la visión binocular. Una imagen anaglífica se compone de dos imágenes filtradas por color (una para cada ojo) ligeramente movidas entre sí para producir el efecto de profundidad. Se filtra la imagen izquierda con un color (normalmente rojo) y la derecha con otro (normalmente azul). Luego esa imagen compuesta se proyecta sobre una pantalla, y con unas simples gafas con filtros de colores se revela el aspecto tridimensional. El ojo que tiene el filtro rojo no ve la imagen presentada en ese color, sólo ve la imagen azul. Y viceversa. Se pueden utilizar distintos filtros de colores complementarios, como verde-magenta o ámbar-azul (usado en los sistemas *SpaceSpex* y *ColorCode 3D*), pero típicamente se emplea rojo-azul por ofrecer buenos resultados tanto en pantalla como en impresión sobre papel.

Este sistema es el más sencillo, barato, versátil y fácil de difundir. Se ha empleado en numerosos medios, desde cine, revistas o videojuegos, hasta para divulgación científica.

Aunque presenta ciertas limitaciones, como la distorsión del color, pérdida de luminosidad y cansancio visual después de un uso prolongado.

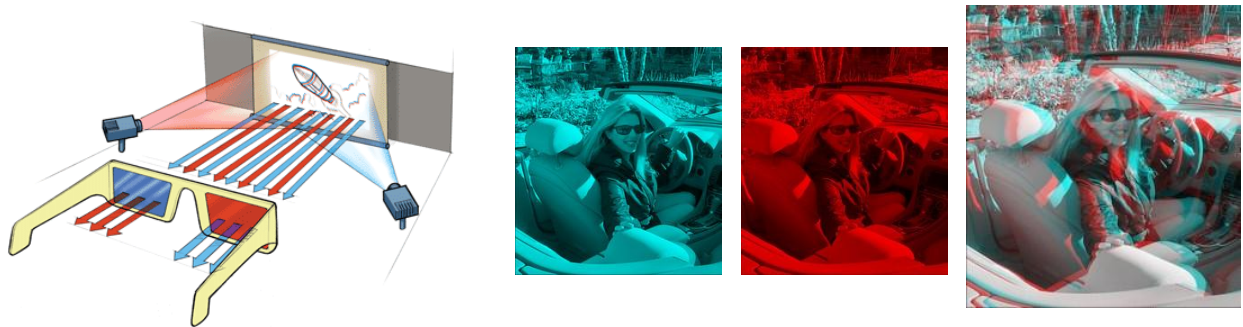


Fig. 4.9. Esquema del sistema anáglifo, con sus fotogramas característicos y el resultado de su mezcla.

4.2.4. Polarización

Es uno de los métodos más extendidos. Consiste en proyectar las dos imágenes (izquierda y derecha) en una pantalla utilizando dos proyectores, cada uno filtrado para que utilice la luz polarizada de una manera. Luego el espectador con unas gafas con lentes polarizadas puede visualizar el estéreo.

En la **polarización lineal**, la más sencilla, la luz polarizada en sentido vertical pasa sin problemas por un filtro polarizador en la misma dirección, pero se ve fuertemente atenuada al pasar por un filtro polarizador en horizontal. Colocando los filtros de forma adecuada en el proyector y en cada lente de las gafas, se consigue que cada ojo sólo reciba la imagen de una de las fuentes de vídeo.

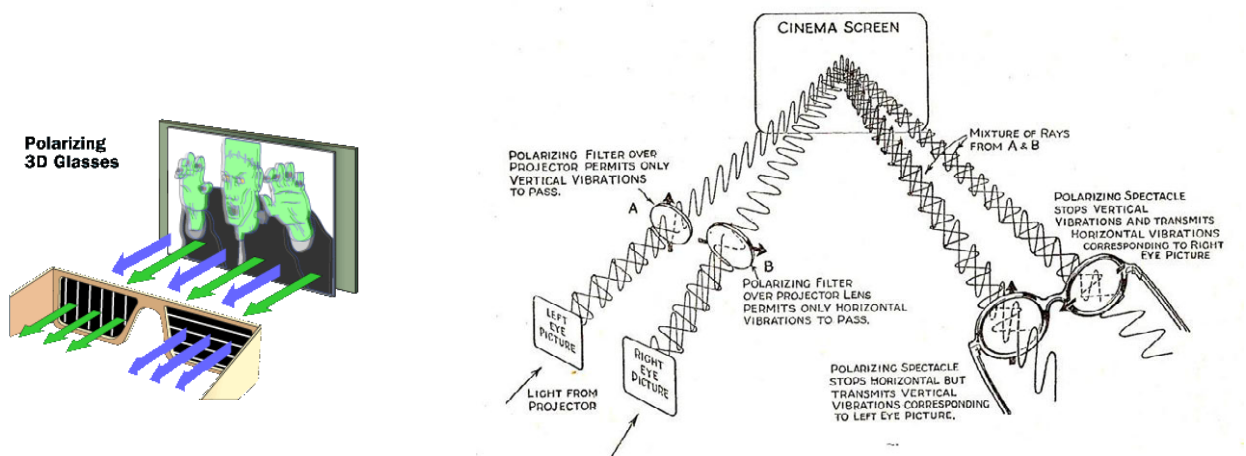


Fig. 4.10. Esquemas del sistema de polarización lineal y circular.

Su ventaja es que presenta una buena fidelidad cromática. Sin embargo, se disminuye la gran cantidad de luz por imperfecciones del filtro y se pierde la visión al inclinar la cabeza. Para solucionar el primer problema, basta con aumentar el brillo de la imagen proyectada. Para el segundo existen varias soluciones, como la **polarización circular**, donde los filtros están preparados para dejar pasar luz polarizada en sentido horario o anti-horario, logrando el mismo efecto discriminador que antes sin depender de la posición relativa en la que se encuentre la lente.

Este es el sistema más económico para una calidad aceptable, por lo que se usa habitualmente en las proyecciones de cine 3D, así como en monitores de ordenador mediante pantallas de polarización alternativa.

4.2.5. Estéreo activo

También conocido como obturación de cristal líquido, LCS o LCD, proyecta sincronizadamente una imagen del ojo izquierdo y una del derecho. Se basa en un dispositivo incorporado en las gafas que permite o bloquea la visión intermitentemente. Este dispositivo consiste en unas pantallas LCD que se vuelven opacas o dejan pasar toda la luz a gran velocidad para que el parpadeo resulte imperceptible. La lente del ojo derecho se hace opaca cuando se proyecta una imagen del ojo izquierdo y viceversa. Para realizar la sincronización entre las gafas y el proyector, y que en cada momento sólo pueda ver el ojo al que le corresponde el fotograma actual, se emplean señales inalámbricas.

Al requerir cierta circuitería y alimentación en las gafas, estas son más caras que las demás, pero conllevan muchas ventajas. Para empezar, los colores se conservan de una forma muy fiel sin que la posición de la cabeza del espectador influya en la calidad del visionado. Además, al no estar basados en polarización, la imagen puede ser proyectada sobre cualquier tipo de superficie o incluso visionada en una pantalla de ordenador o televisión casera. Este es el método utilizado en los cines que usan la tecnología *XpanD 3D*.



Fig. 4.11. Gafas del estéreo activo.

4.2.6. Dolby 3D

Es una variante más refinada de los típicos anáglifos. En vez de partir en dos el espectro de luz visible, lo que se hace es partir en dos los espectros de cada color primario: rojo, verde y azul. Al componer la imagen en base a tres colores distintos, se consigue una mayor fidelidad cromática. Cada imagen por separado se puede ver perfectamente porque no le faltan componentes espectrales importantes.

La forma de lograr que cada fotograma esté filtrado de una forma u otra alternativamente es colocar una rueda delante del proyector en la que cada mitad está formada por uno de los filtros. Al hacer girar la rueda a la velocidad adecuada se consigue el efecto. Mientras, las gafas también disponen de filtros similares, uno diferente para cada ojo. La fabricación de estos filtros no es sencilla ni barata, por lo que en términos de precio, se sitúan entre las gafas polarizadas y las de estéreo activo.



Fig. 4.12. Sistema Dolby 3D.

4.2.7. ChromaDepth

Se basa en la desviación que producen los diferentes colores del espectro. En un prisma, la luz se desvía ligeramente dependiendo de su longitud de onda, desde una mayor desviación en el rojo, hasta la menor en el azul. En este método la información de profundidad se codifica por colores, y las gafas están compuestas por unos cristales transparentes con micro-prismas. Cuando la imagen (*CyberHologram*) se observa con estas gafas (*HoloPlay* para imágenes de ordenador o *C3D* para imágenes impresas), la imagen 2D se convierte en tridimensional.

El mayor inconveniente de este sistema es la notable pérdida de información cromática, pero a cambio tiene la ventaja de que estas imágenes pueden verse también en 2D.

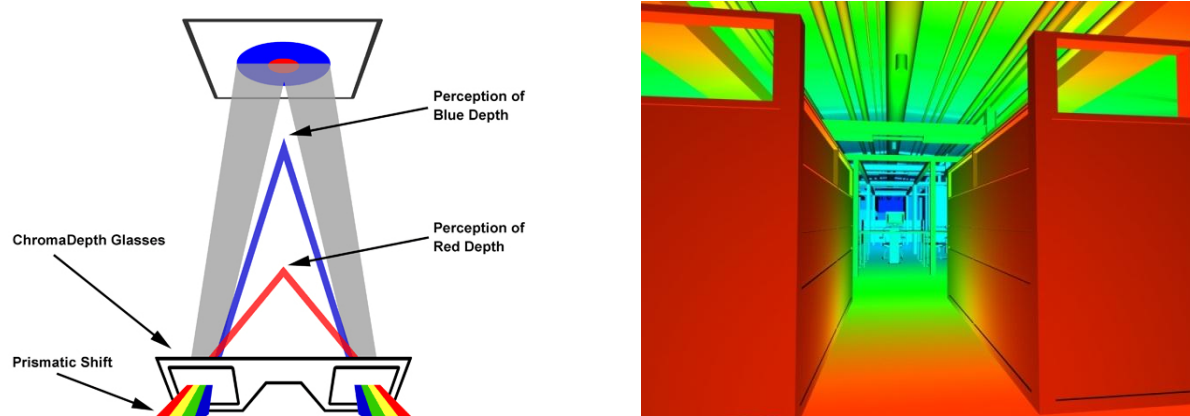


Fig. 4.13. Sistema *ChromaDepth* y su fotograma característico.

4.2.8 Pantallas independientes

También llamado HMD (*Head Mounted Display*), se trata de un casco estereoscópico que consta de dos pequeñas pantallas situadas delante de cada ojo, mostrando una imagen para cada uno. Como estas se generan en el propio dispositivo, es muy fácil determinar qué es lo que ve cada ojo exactamente en cualquier momento. Pero hace falta una tecnología puntera para fabricar pantallas lo suficientemente pequeñas y ligeras, pues cuentan con una resolución y autonomía bastante elevada.

Este método es con diferencia el más caro, y se utiliza en aplicaciones de realidad

virtual 3D, ya que permite una experiencia más inmersiva para el usuario. Además puede usarse junto con otros sistemas como el seguimiento de posición (mediante acelerómetros o dispositivos ópticos) para lograr resultados más realistas.



Fig. 4.14. Head mounted display.

4.2.9. Monitores auto-estéreo

Dentro del 3D sin gafas, existen una serie de técnicas encaminadas a discriminar la visión de cada ojo sin utilizar ningún aparato externo a la pantalla. Emplean microlentes dispuestas paralelamente sobre la pantalla, que generan una cierta desviación. Los dos métodos más utilizados son la barrera de paralaje y la hoja lenticular.

La **barrera de paralaje** consiste en una rejilla vertical puesta delante de una imagen especialmente diseñada. Se trata de un material opaco con fracturas verticales transparentes y finas, espaciadas de manera regular. Cada raja transparente actúa como ventana a un trozo vertical de la imagen puesta detrás, que está hecha interpolando las columnas a partir de dos imágenes. Esta imagen especial y la rejilla vertical están alineadas de modo que el ojo izquierdo pueda ver sólo las tiras de la imagen para el ojo izquierdo, y viceversa en el caso derecho.

La **hoja lenticular** está formada por pequeñas lentes finas y largas, moldeadas con forma cilíndrica en un sustrato plástico, y dispuestas de la forma adecuada para dirigir la luz a cada ojo independientemente de la posición del mismo. La imagen trasera se diseña para enfocar la línea de la vista de cada ojo sobre diversas tiras y se forma esencialmente de la misma manera que para un estereograma de paralaje. Es muy importante la calidad y la

uniformidad de la lente. Además, en este caso la superficie entera de la lente irradia luz, por lo que no hay zonas opacas. Una de sus primeras aplicaciones comerciales fue la consola portátil *Nintendo 3DS*, así como algunas pantallas de televisión.

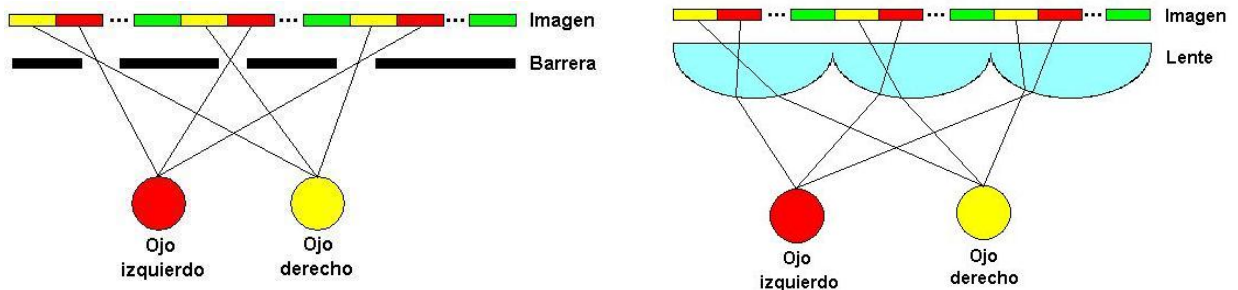


Fig. 4.15. Esquemas de la barrera de paralaje y la hoja lenticular.

El inconveniente de ambos sistemas aparece cuando los ojos cambian de posición, introduciendo un ángulo respecto a la perpendicular de la pantalla. Se puede optar por hacer que sólo una posición sea correcta para apreciar el 3D, o bien incorporar un detector de posición de los ojos del espectador para adecuar a ellos el efecto.

Estos métodos son el futuro dentro del campo de la televisión, los ordenadores, la telefonía y las videoconsolas, ya que los demás sistemas disgustan al público por numerosas razones: la limitación del número de gafas al número de personas que podrían ver las imágenes en 3D, la necesidad de diferentes marcas de gafas para los diferentes modelos de pantallas, la fatiga sufrida por los ojos o la incomodidad de uso.

4.2.10. Auto-estereogramas

Se dibuja la proyección que crearía el objeto tridimensional a representar en el plano de la imagen, para cada uno de los ojos. El resto de la composición puede ser una repetición de pequeños patrones o un mosaico de puntos generados aleatoriamente. Para lograr recuperar la imagen tridimensional el cerebro detecta las sutiles modificaciones de los patrones, imperceptibles a un primer vistazo, y modifica el enfoque hasta lograr ver la imagen completa.

Esta técnica puede resultarle difícil a algunas personas mientras que otras logran verlos con facilidad. Por esto, además de por lo cansado que resulta verlos durante mucho tiempo, no se emplean en video. Gozan de gran popularidad desde la década de los 90.



Fig. 4.16. Estereograma y auto-estereograma.

4.2.11. Efecto Pulfrich

No es propiamente un sistema de visualización estéreo, ya que no se parte de un par de imágenes sino de una sola animada. Aparece cuando se observa una imagen en movimiento horizontal sobre un plano, con un filtro oscuro situado delante de uno de los ojos (la otra lente es transparente). Debido a la menor luminosidad que percibe el ojo con el filtro, la imagen llega al cerebro con un retardo de unas centésimas de segundo. Por tanto, el cerebro percibe la misma imagen pero con una pequeña diferencia de posición horizontal (fotogramas de retraso).

Los videos realizados con este sistema pueden verse sin gafas perfectamente (sin apreciarse efecto 3D) y estas gafas pueden usarse con todo tipo de monitores, llegando a apreciar 3D en escenas en movimiento de películas 2D. El mayor problema es que sólo se aprecia el efecto cuando hay un movimiento constante, y como la profundidad depende de éste, es difícil de controlar. Se han ideado sistemas para generar el movimiento de las imágenes sin mover la cámara (*CircleScan 4D*), pero en general, el sistema ha sido relegado a un punto de vista experimental.

4.3. Sistemas de proyección

A la hora de proyectar estas imágenes 3D para ser visualizadas con alguno de los sistemas anteriores, se puede hacer de maneras a su vez diversas. Hay que tener en cuenta el tipo de codificación utilizado, así como si el proceso es analógico o digital.

4.3.1. Pantallas

Como vimos en el apartado anterior, hay dos sistemas destacados para visualizar contenidos 3D. Por un lado, las **pantallas estereoscópicas** consisten en pantallas de 2D convencionales que necesitan unas gafas especiales y son las elegidas para el cine. Y por otro, las **pantallas auto-estereoscópicas** permiten disfrutar de la sensación 3D sin ningún tipo de complementos, aunque incorporan dispositivos especiales delante de ellas, limitando por ello su uso a 3D. Estas últimas están más extendidas en el mundo de la televisión y otros dispositivos domésticos. Pero para el campo cinematográfico, se opta por el uso de gafas, que dan una calidad mucho mejor que cualquier sistema sin gafas, aunque sean a su vez la parte más débil de la cadena, pues cualquier imperfección o suciedad altera la visión.

Cualquier pantalla se basa en un sistema de codificación para filtrar la imagen que verá cada ojo. Según esta codificación/decodificación utilizada, se pueden clasificar los sistemas anteriores de la siguiente forma:

- En el espectro de color: Anáglifo, Dolby y ChromaDepth.
- En el tiempo: Estéreo activo (LCD) y Efecto Pulfrich.
- En la luz: Polarización lineal o circular.
- En el espacio: Pantallas independientes (HMD) y Monitores auto-estéreo (sin gafas).

4.3.2. Proyección analógica

La proyección analógica 3D en salas comerciales comenzó utilizando dos proyectores independientes sincronizados. A la óptica del proyector se le añadía un sistema de prismas o espejos para superponer las imágenes en la pantalla (además de los filtros polarizadores o la

rueda de color en sus respectivos casos). Pero poco a poco, se ha ido sustituyendo por un único proyector, con un rotor, doble transporte de película (de 65 mm), y los objetivos situados uno sobre otro y muy próximos entre sí.

Existen numerosas salas permanentes para proyección 3D, donde compiten básicamente tres sistemas:

- **IMAX:** Proyecta en el formato 15/70 y con desfile horizontal para pantalla gigante. Se proyecta una película de 70 mm, aunque se grabe en 65 mm y no sitúe las pistas sonoras en esos 5 mm restantes sino en otra fuente de sonido separada.



Utiliza tanto el sistema de polarización (*IMAX 3D*) sobre pantallas planas cubiertas de una pintura metalizada especial, como el estéreo activo (*IMAX SOLIDO*) sobre pantallas curvadas o panorámicas. El espectador tiene cubierto completamente su campo visual, siendo la visión 3D más amplia que en cualquier otro sistema.

- **Showscan:** Proyecta en el formato 5/70, pero desfila a una velocidad de 60 fotogramas por segundo en lugar de 24. Esto proporciona al espectador mayor presencia y resolución de la imagen, que aporta más realismo.



- **Iwerks:** Proyecta en formatos 5/70, 8/70 y 15/70, usando gafas polarizadas o gafas activas LCS. Además, cuenta con una amplia oferta en sistemas de proyección en pantallas planas y semiesféricas, cine en 360°, cine dinámico o 4D (movimiento programado de los asientos al ritmo de la película), sistemas de realidad virtual en vídeo, etc.



4.3.3. Proyección digital

Actualmente, el formato de proyección 3D más habitual es el digital, ya que evita los grandes costes de dobles bobinas para cada copia de un film. Los sistemas de proyección digital D-Cinema usan un único proyector DLP (*Digital Light Processing*) [24], conectado a un servidor. Estos proyectores usan un dispositivo digital de micro-espejos y presentan muchas ventajas frente a los LCD, como no necesitar filtros (que se deben limpiar y reemplazar periódicamente) ni lámparas (ya que utilizan iluminación de estado sólido) y por tanto ser más económicos, además de conseguir una magnífica legibilidad por su buen contraste. La película viene almacenada en un archivo llamado DCP (*Paquete Completo Digital*), con su contenido comprimido y cifrado, como se explica en el apartado 5.5.1 *Formato para exhibición en cines*.

Desde el servidor de cine digital se reproduce una única película que contiene los fotogramas izquierdo y derecho alternados. El proyector presenta las imágenes en pantalla de la misma forma, a una cadencia de 24 fotogramas por segundo. Para evitar diferencias de fase en los movimientos, se usa la técnica de "*triple-flash*", con la que cada fotograma de cada ojo se presenta tres veces, de forma que la frecuencia por ojo sube a 72 fotogramas por segundo, dando un total de 144 fotogramas por segundo.

Los límites físicos del proyector DLP, las gafas y el camino de la luz condicionan la proyección. Por un lado, todos estos sistemas tienen mala **eficiencia luminosa** (que puede incluso llegar a un 20%), debida especialmente a las pérdidas en los filtros. Además, no se aíslan perfectamente las dos señales (derecha e izquierda), sino que hay un pequeño cruce que puede producir *ghosting*. Por último, la **fidelidad del color** no es total. Por ejemplo, el sistema *RealD* necesita un proceso de *ghost-busting* para detectarlo y evitar que se produzca, pero a su vez es el más neutral en cuanto a color (sólo experimenta un pequeño cambio al girar las gafas).

A partir de este punto, cada sistema utiliza una tecnología de visualización distinta, que ya hemos descrito anteriormente. Serxio Gómez [25] hace la siguiente clasificación, que divide los sistemas de proyección digital más importantes en función de las gafas que utilizan: pasivos (*RealD*, *Dolby 3D*, *Imax 3D* y *Technicolor 3D*) y activos (*Xpand 3D*).

- **RealD Cinema:** Método de polarización circular. Utiliza un solo proyector que alterna ambas imágenes, mediante un polarizador de control electrónico. Tiene el inconveniente de que necesita una pantalla especial (plateada, que refleje y no atenúe el brillo de las imágenes) y por tanto genera un gran coste, pero la ventaja de que las gafas son desechables y muy baratas.



- **Dolby 3D:** Método de la rueda de color. El proyector necesita emitir al doble de potencia para lograr el mismo efecto que una proyección 2D, pero no necesita una pantalla nueva. Su inconveniente es que las gafas que utiliza son bastante caras por su complejo sistema de filtros.



- **Xpand 3D (Nuvision):** Método de estéreo activo. El proyector emite las imágenes sin ningún tipo de filtrado. Son las gafas, basadas en el obturador LCD sincronizado con la pantalla a través de infrarrojos, las que filtran las imágenes para cada ojo. Esto requiere gran circuitería y baterías, que las hacen más pesadas, voluminosas y caras.



Hay y ha habido muchos otros sistemas como *MasterImage 3D* (mezcla de obturación con filtros polarizados circularmente, y sobre pantalla plateada), distintos sistemas anáglifos (como *Anachrome*, *Mirachrome*, *Trioscopic*, *TriOviz 3D* y *ColorCode 3D*), o el propio *IMAX 3D* en formato digital (con gafas 3D polarizadas linealmente o gafas 3D de obturación).

5. PROCESADO DEL MATERIAL ESTEREOSCÓPICO

El paso intermedio entre la grabación de las imágenes y su proyección es la post-producción digital, donde podemos corregir o perfeccionar algunas características del material grabado y terminar de dar el aspecto adecuado a nuestras imágenes. Partiendo de un potente equipo que soporte el doble del flujo habitual, el material tendrá que pasar por las etapas de edición, composición, etalonaje y empaquetado final.

5.1. Equipos para trabajar en 3D

5.1.1. Hardware

El hardware abarca todos los equipos y elementos físicos. Teniendo en cuenta los distintos niveles de producción, el **equipo más básico** para *amateurs* sería un simple ordenador personal con una buena tarjeta gráfica, gran memoria y una pantalla de buena resolución y luminosidad (para compensar la pérdida por las gafas). Esto nos permitiría llevar a cabo las primeras pruebas y experimentos en 3D.

En el ámbito profesional, el gran flujo de material requiere una **estación de trabajo para 3D**, dotada con el doble de potencia y capacidad que una producción en 2D. Esta estación consta de los siguientes elementos:

- **Monitores:** Suelen utilizarse al menos un par de pantallas, una 2D para trabajar y otra 3D para probar y visualizar el efecto. La primera será un pequeño monitor técnico, para controlar las disparidades entre las imágenes teniendo en cuenta las reglas estudiadas, el *storyboard* y el presupuesto de profundidad. Además se pueden corregir la colorimetría, la luminancia o incluso errores geométricos, de forma manual o automática. La segunda debe ser una gran pantalla para la evaluación artística de la percepción del 3D.

Estas pantallas suelen ser tipo LCD con iluminación LED (las más comunes) o Plasma (PDP). Se distinguen además dos tipos: LCD multicapa y micropolarizado para estéreo pasivo, y LCD de 120 Hz o plasma para estéreo activo. Su tamaño aconsejable

está entre 19" y 24" (medida en pulgadas de la diagonal), considerando que cuanto más grande sea el monitor, mejor será la experiencia en 3D. Actualmente, el formato más utilizado es el panorámico 16:9 con una resolución Full HD 1080p (1920x1080 con escaneo progresivo). El tiempo de respuesta (cuánto tarda un pixel en cambiar de color, medido en *ms*) debe ser lo menor posible, para que menor sea el riesgo de efecto *ghosting* o *blurring*. Debe estar coordinado con la frecuencia de refresco (cantidad de barridos por segundos del panel LCD, es decir, cuantas veces se renueva la imagen en la pantalla, medido en *Hz*). En 2D es 60 Hz, pero en 3D se requieren por lo menos 120 Hz para garantizar una aceptable visión tridimensional. De esta manera, cada ojo recibe 60 fotogramas por segundo que es lo normal en un monitor LED. Otros parámetros importantes son el brillo (medido en *cd/m²*) y el ratio de contraste (por ejemplo, 80000:1), que debe ser lo más alto posible (hay que tener en cuenta la relación de contraste estática, ya que la dinámica es un valor subjetivo de cada fabricante). Además, pueden incluir conexión VGA, DVI, USB multiuso, HDMI y conexiones inalámbricas Wifi o Bluetooth.

Las técnicas estereoscópicas actualmente en uso para reproducir contenido desde una pantalla 3D son el anáglifo, la polarización y el estéreo activo (la más utilizada), aunque cada vez se prescinde más de las gafas gracias a la tecnología auto-estereoscópica.

- **Tarjeta gráfica para estéreo:** Es una tarjeta de expansión para el ordenador que se encarga de procesar los datos provenientes de la CPU y transformarlos en información representable en el monitor. Para 3D, destacan las tarjetas *AMD HD3D* o *NVIDIA Quadro*. Son compatibles con muchas aplicaciones de cuatro buffers (*Quad Buffering*), que en lugar de utilizar sólo los dos buffers habituales (frontal y trasero) para almacenar los datos, usan cuatro (frontal izquierdo, frontal derecho, trasero izquierdo y trasero derecho) para guardar las dos imágenes a la vez de manera más eficiente. Esta técnica ofrece una visión 3D más natural, tanto en pantalla completa como en múltiples ventanas.

A nivel de programador, trabajar con una tarjeta gráfica es complicado, por lo que existen interfaces (API) que abstraen de su complejidad y diversidad. Las dos más

importantes son *Direct3D* (de *Microsoft*, dentro de la librería *DirectX*, que funciona sólo para *Windows*) y *OpenGL* (de *Silicon Graphics*, que es gratuita, libre y multiplataforma).

- **Gafas:** Las tecnologías más habituales en grandes producciones son *XpanD* y *RealD*, desarrolladas en profundidad en el apartado de 4.2. *Sistemas de visualización estereoscópica*.
- **Discos duros añadidos:** Se requiere gran capacidad para manejar el elevado ancho de banda. Por ello se añaden discos duros externos, conectados en formato RAID (se suman sus capacidades y velocidades como si fuera sólo uno), para que uno lea mientras otro escribe. Así se consigue mayor integridad, tolerancia a fallos y rendimiento.
- **Sincronización multi-pantalla:** Una configuración de monitor dual permite organizar el espacio de trabajo de forma más eficaz, realizar varias tareas más cómodamente y cometer menos errores. Los módulos de expansión gráfica (GXM) *Matrox DualHead2Go* y *TripleHead2Go* son pequeñas cajas negras que permiten conectar dos o tres monitores al ordenador. Se conectan a la salida VGA, DVI o DisplayPort y utilizan la GPU (unidad de procesamiento gráfica) del sistema para ofrecer 2D, 3D y vídeo de gran calidad en todos los monitores. Permite ejecutar aplicaciones distintas en cada monitor o ver una aplicación distribuida entre ellos.



Fig. 5.2. Dispositivo *DualHead2Go* con dos monitores y un portátil enlazados.

5.1.2. Software

El software comprende los programas y elementos virtuales. Hay numerosos editores de video y programas de post-producción que se pueden utilizar para trabajar con 3D. Los comentamos brevemente ya que van cambiando con el tiempo y sus características están continuamente renovándose y mejorando.

Por un lado, encontramos los **editores amateur**, es decir, programas sencillos, con las características más básicas y normalmente de distribución libre y gratuita, como *Stereoscopic Player*, *StereoMovie Maker*, *AviSynth*, *Roxio Creator* o *Magix Movie Edit*.

Después tenemos los **editores 2D adaptados a 3D**, programas profesionales para video convencional que han expandido sus características para soportar también 3D. Son también accesibles para producciones más modestas. Destacan los paquetes de *SONY VEGAS PRO* (Versión 8.0 o posterior, con el plugin *Make3D*) y *ADOBE CREATIVE SUITE* (*Premiere* y *After Effects*, con el plugin *LumaChroma*), así como los programas *NUKE* (Versión 4.5 o posterior, con el plugin *OCULA*), *SHAKE* (Versión 4 o posterior) y *CineForm Neo3D*, entre otros.

Y por último, los **editores profesionales de 3D**, especializados exclusivamente en la tecnología 3D, como *AVID (DS 10)* o *ASSIMILATE (Scratch)*. El etalonaje o corrección de las imágenes suele hacerse aparte en otros programas específicos, como *QUANTEL*, *IRIDAS*, *LUSTRE* o *BASE LIGHT*.

5.2. Edición

La **edición** o **montaje** es el proceso por el cual se elabora el trabajo audiovisual a partir de las imágenes, videos, animaciones y audios recopilados. Básicamente consiste en reproducir el material, seleccionar y recortar las partes deseadas, ordenarlas en tiempo real y añadir todo tipo de efectos deseados (transiciones, filtros, textos...). Requiere equipos potentes para dar respuesta en tiempo real, sincronización del sonido, capacidad de lidiar con una gran cantidad de material y de permanecer estable ante largas reproducciones.

5.2.1. Cortes y continuidad

Es recomendable cumplir algunas reglas en los cortes entre tomas para conseguir la mejor recepción estereoscópica. En primer lugar, se debe mantener la **continuidad en la profundidad**:

- Hay que evitar cortes entre tomas cuya continuidad no encaja (escenas con puntos de convergencia muy alejados, como por ejemplo una imagen detrás de la pantalla seguida de un primer plano cercano) pues ese salto supone una difícil fusión para el espectador.
- Los cortes con saltos de profundidad hacia delante o hacia atrás se aprecian diferentes. Es más molesto un salto hacia delante, pues el punto de convergencia de la nueva imagen se acerca al público, en vez de relajar la vista hacia el fondo como lo haría un salto hacia atrás.
- Una forma de cortar entre dos tomas que no están alineadas en 3D, es mediante el corte de profundidad activo. Lo que se hace es igualar la convergencia de los dos dinámicamente, mediante la HIT (explicado en el próximo apartado), haciéndolo coincidir en el centro. Es rápido e inapreciable, pero fácil de seguir por el espectador.

Aunque los puntos de edición suelen ser cortes limpios, también existe la posibilidad de utilizar **transiciones**, que se aprecian muy diferentes en 3D. Por ejemplo, los fundidos cruzados (*cross-fade*) son mucho más potentes que en 2D (siempre que se mezclen dos imágenes que ocupen el mismo paréntesis de profundidad) pues los personajes parecen

materializarse. Otras transiciones como barridos (*wipe*) o división de pantalla (*split-screen*), necesitan ser adaptados suavizando sus bordes para poder fusionarse y ser apreciados sin molestias.

5.2.2. Edición en 3D

Podemos llevarla a cabo desde dos perspectivas diferentes, según demos prioridad a la edición (el director tiene más libertad de creación, dejando el 3D como una mera herramienta más) o al 3D (se reparte el efecto tridimensional en las dosis adecuadas, frenando el ritmo de edición en imágenes con fuerte resistencia al 3D).

Para la **edición previa en 2D**, primero se realiza el montaje en 2D y se exporta la EDL (lista de decisión de edición). Después se pasa a un equipo de 3D (VFX), para que el director lo vea y diga los cambios que deben realizarse. Estos cambios se realizan sobre el 2D, repitiéndose el proceso a partir de la nueva EDL. Las ventajas son que se puede utilizar cualquier estación de edición e interfaz de usuario convencional, y que sólo se pasan a 3D las tomas buenas, ahorrando tiempo y trabajo. Los inconvenientes son que al elegir las tomas antes de apreciar el 3D, no lo optimiza, y que se requerirán muchos viajes de 2D a 3D y viceversa hasta el resultado final.

Para la **edición directa en 3D**, se afina previamente el 3D de todas las tomas: correcciones de disparidades horizontales (*parallax*) o verticales, eliminación o arreglo de las tomas con mal 3D, etc. También se puede modificar el **HIT** (traslación horizontal de la imagen), es decir, la distancia entre las imágenes derecha e izquierda (que en principio sería nula, pues están exactamente superpuestas), cambiando así el valor de los *parallax* y por tanto moviendo el punto de convergencia y la posición de profundidad de la escena sobre la pantalla. El director supervisa esa versión 3D que se puede ir modificando sobre la misma versión. La mayor ventaja es que se ve directamente el 3D, sin usar tomas que no funcionen. El inconveniente es que hay que convertir todo el material a 3D antes de editar.

Los cambios se realizan de manera no-destructiva, para poder modificarlos en alguna etapa posterior si es necesario, y conservando un área de seguridad (que se adapte al NSPP en cada lado del cuadro, ya que en este proceso se realiza algún zoom-in o acercamiento de la imagen). Las correcciones se graban en una lista de decisión de profundidad (DDL).

5.2.3. Subtítulos en profundidad

Los subtítulos son bloques de texto colocados sobre la imagen en la parte inferior del cuadro, en los que se muestran los diálogos de los personajes. Suelen almacenarse en archivos de texto o de imagen PNG que se superponen sobre el máster, para no tener que guardar una versión de la película por cada idioma. Sin embargo, para 3D esto es inevitable, pues para poder ser enfocados y leídos correctamente por el espectador, debe tratarse su profundidad e ir superpuestos en las propias imágenes del máster. Por ello, los subtítulos se colocan con un *parallax* negativo próximo a la profundidad que tiene la acción principal, con una sombra más fuerte y oscura de la habitual (para resaltar más sobre los planos que tiene detrás).

5.2.4. Sonido estereofónico

El sonido ha sido tridimensional mucho antes que la imagen, con su **sistema multicanal surround**, que nos hace escuchar la película a nuestro alrededor. Sin embargo, aún no se ha enlazado imagen y sonido en términos de 3D. Las áreas de acción no se superponen perfectamente, pues en la imagen la zona de confort es triangular, y en el sonido la sala es rectangular. Además, el sonido no sigue el movimiento de la imagen 3D cuando nos cambiamos de asiento (en 2D no era problema ya que no se movía la imagen, estaba siempre sobre la pantalla). Por último, en 3D se distribuyen de diferente modo los canales, dejando de ser una mezcla con voces estéreo y el sonido ambiente al fondo, para pasar a enfatizar los efectos de adelante a atrás.

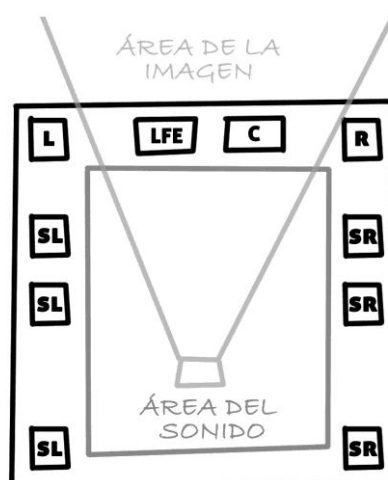


Fig. 5.3. Volúmenes de imagen y sonido en una película 3D.

5.3. Composición

Como hemos dicho en apartado anterior, las tomas utilizadas en la edición se pasan a equipos VFX para ser manipuladas previa o posteriormente. Por tanto, cada una de ellas debe pasar por varios procesos digitales, desde correcciones básicas, aplicación de efectos y su composición en forma de secuencia de video, hasta el *rendering* con el que obtenemos el archivo que será usado para el montaje final. Además, algunas imágenes pueden ser creadas artificialmente, como es el caso de las generadas por ordenador o la conversión de películas nativas 2D a 3D.

5.3.1. Composición y efectos

La composición es la unión asimétrica del metraje 2D derecho e izquierdo. Requiere visualización en tiempo real, para controlar las distintas características del efecto sobre la toma. Al llevar a cabo cualquier retoque en post-producción, por mínimo que sea, la toma de 3D se convierte en una toma de FX (efecto).

Una de las tareas en esta etapa es la **corrección de errores**, en especial de **convergencia**. Si la posición de la cámara está animada, el arreglo se adecúa mediante *keyframes*, que suelen marcar las posiciones extremas de la cámara y los valores máximos de *parallax*, entre los cuales el ordenador interpola los demás. También se corrigen las **imperfecciones del rig**, como la exposición, el color, la desincronización de imágenes... Para arreglarlas, se usan *track points* (puntos de camino) que ajustan cuadro a cuadro.

Otra de las tareas es la aplicación de los **efectos visuales**, más complejos que en 2D, y que pueden variar si se aplican a un solo ojo a los dos. Deben ser muy precisos, pues lo que sobre la pantalla es un píxel, en la profundidad de la sala puede convertirse en muchos centímetros. Por ejemplo, en los efectos de pantalla verde, que recortan los elementos mediante máscaras sobre el canal *alpha*, un leve cambio en el umbral que define el borde de los objetos, puede afectar a varios píxeles, que equivalen a un espacio mayor en profundidad. Siempre que usemos un efecto por primera vez, hay que verificar que no aparezcan artefactos de profundidad.

Ya hemos mencionado que las herramientas de post-producción en 3D son poco accesibles para *amateurs* o presupuestos medios, por lo que pueden utilizarse las de 2D como vimos en la etapa de edición. Primero **se configura la composición 2D y se duplica** (normalmente partiendo de la vista izquierda), adaptándose para cada efecto, como invertir la dirección de los mapas de vectores de movimiento o ajustar otros mapas de profundidad. Se puede proceder de tres formas: procesar las dos imágenes 2D por separado, procesar las dos imágenes apiladas en 2D (en vez de procesar dos veces, juntarlas y procesar una sola vez, aunque la imagen total superará los píxeles convencionales y el ordenador tendrá más problemas), o procesarla como una sola imagen 3D. Después se realiza el **afinado en 3D** empujando elementos horizontalmente, ajustando la posición de los bordes, etc. También se realizan los ajustes para el tipo de visualización. Por ejemplo, para el sistema anáglifo se cambian los canales RGB: se eliminan los canales G (verde) y B (azul) para el ojo izquierdo, se elimina el R (rojo) para el derecho, y se añade el canal de luminancia en ambos. Sin embargo, para la visualización 3D a todo color, en un monitor entrelazado, se hace un filtro peine que alterne líneas negras y blancas, se multiplican las imágenes y se suman.

Lo más eficiente en estos casos es ir trabajando por niveles de calidad, incrementándola poco a poco según vayamos requiriendo mayor precisión de los ajustes que llevamos a cabo:

- 1. Baja resolución:** Se codifica en anáglifo, a baja resolución, y se puede visualizar en cualquier pantalla. Se seleccionan las tomas, se marcan las que su 3D debe ser corregido, y se hace un primer montaje.
- 2. Resolución media:** Se codifica en entrelazado/interlineado, con resolución SD o HD, y se visualiza en una pantalla lo más grande posible (CRT con gafas LCS, o en un LCD micropolarizado).
- 3. Alta resolución:** Se codifica en una compresión espacial de 3D (como *Side-by-Side*), a resolución FullHD o 2K. Se visualiza en pantallas 3D de cine, con decodificación electrónica (incluyen un *rig* de proyector dual de 120 Hz, doble capa y separador de haz).

5.3.2. Mapas de profundidad

Los **mapas de bits** son imágenes en escala de grises que sirven para definir los valores de una característica concreta de la imagen píxel a píxel. La mayoría son de 8 bits (256 valores) y requieren una tabla de referencia (LUT) con los valores absolutos a los que se refieren. En estereoscopia se utilizan varios mapas.

El **mapa de profundidad** almacena los cambios a lo largo del eje Z, es decir, cada punto se le asigna el valor de la distancia del objeto a la cámara (donde el blanco representa lo más cercano, y el negro lo más lejano). Es para el 3D lo que el canal *alpha* para el 2D: la clave para una mezcla de imágenes indetectable, efectos agradables y flujos de trabajo eficientes. En animación por ordenador es fácil obtenerlo, pero para imágenes reales tiene que ser calculado.

El **mapa de desplazamiento** marca los cambios en el eje X, es decir, la diferencia de un mismo punto entre las dos imágenes (izquierda y derecha). Puede utilizarse para controlar el *parallax* o incluso generar el nuevo punto de vista.

Por último, el **mapa de vectores de movimiento** marcan los cambios temporales, y se utilizan en la compresión de vídeo, desenfoques de movimiento, y los efectos de reajuste temporal.

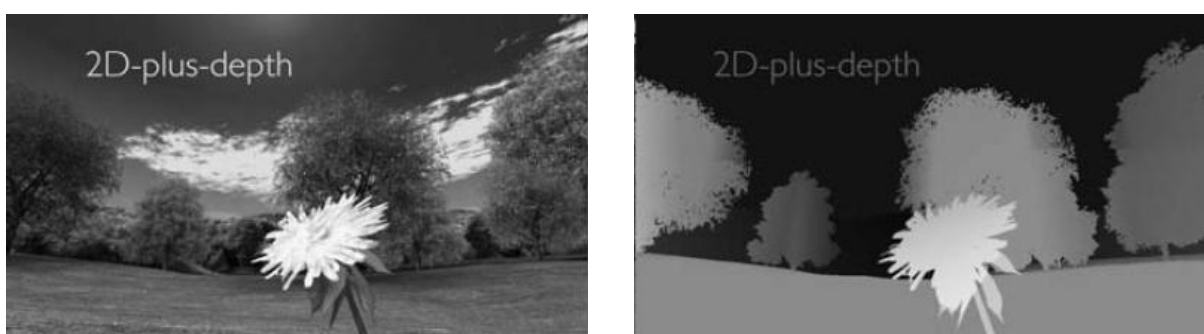


Fig. 5.4. Imagen y su correspondiente mapa de profundidad.

5.3.3. Formatos 2D adaptados a 3D

Al usar herramientas 2D para obtener 3D, aparece el problema de que ninguna interfaz de usuario convencional proporciona espacio para imágenes del doble del tamaño, ni una pantalla 3D real. Por ello, se codifica el estéreo en un formato compatible monoscópico, que posteriormente se descifra a 3D en la reproducción y para últimos retoques.

Existen formatos de patentes libres, como el clásico anáglifo (rojo-azul y magenta-verde), quincunx, Side-by-Side o entrelazado/interlineado; y formatos propietarios como anáglifo color (*ColorCode 3D*), anáglifo VFX (*Trioviz*), Tablero propietario (*SENSIO*) o Doble flujo propietario (*TDVision*). Los más importantes son:

	Características	Compatible o visible con
Anáglifo	Imágenes derecha e izquierda codificadas en espacios de color	Cualquier pantalla con gafas de anáglifos
Side-by-Side	Imágenes comprimidas en las mitades izquierda y derecha de la pantalla	TV o decodificador
Over/Under	Imágenes comprimidas en las mitades superior e inferior de la pantalla	TV o decodificador
Interlineado	Todas las filas de cada ojo se seleccionan para componer la imagen	3DTV con interlineado, Pantallas planas polarizadas, Monitores CRT
Tablero Raw	Todas los píxeles de cada ojo se seleccionan para componer la imagen	3DTV de proyección trasera
SENSIO	Optimización propietaria de quincunx	Decodificador propietario

Fig. 5.5. Tabla de los formatos 2D adaptados para 3D.



Fig. 5.6. Ejemplos de imágenes en los formatos 2D adaptados para 3D.

5.3.4. Rendering

El *rendering* (o renderizado) es el proceso de generar una imagen o vídeo partiendo de un modelo en 3D, a través de un medio informático que interpreta la información de geometría, texturas, iluminación o efectos. En este proceso, se deben cumplir algunas exigencias:

- Renderizar las imágenes más anchas que el resultado final, para acomodar la HIT de convergencia, y tener unos “márgenes de seguridad” con los que poder realizar más tarde ajustes de la posición de profundidad, según la siguiente fórmula:

$$\text{Ancho_Imagen_Renderizada} = \text{Resolucion_Final} + (2 \times \text{NSPP})$$

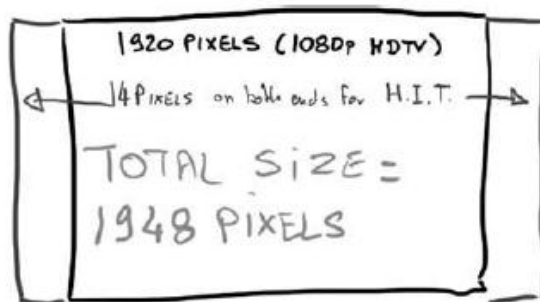


Fig. 5.7. En un *rendering* de HDTV para una sala de cine, se requieren 14 píxeles más a cada lado.

- Optimizar el *rendering* para estereoscopia agrupando las dos cámaras en una sola tarea de render.
- Guardar la información de los cambios en la distancia cámara-objeto (buffer de Z) en un archivo especial llamado mapa de profundidad, ya que esta información será necesaria más tarde para la composición.
- Tener cuidado con espejos y reflejos, que deben ser tratados con profundidad, no como elementos planos.

Este proceso se utiliza tanto en cada una de las tomas individuales, como en la exportación de la película final. Para este último caso, cuando se alcanza la máxima calidad con el formato 2D adaptado (por ejemplo, *Side-by-Side*), se componen las dos películas 2D y se renderiza a 3D de máxima resolución, logrando el master final. Para ello, primero se duplica la EDL (EDL izquierda y derecha), copiando así los puntos de corte y transiciones, y se ajusta la posición de profundidad y demás correcciones geométricas. Después se usan las EDL, reemplazando los archivos de 2D por el material de máxima resolución.

5.3.5. Imágenes 3D generadas por ordenador

El 3D más sencillo es el de **imágenes generadas por ordenador** (CGI). Al estar los objetos creados ya inicialmente como modelos 3D, añadir una segunda cámara es poco costoso. Las imágenes se producen con ***rigs de cámara virtuales***, es decir, configuraciones de cámaras creadas a través del ordenador. Son mucho más flexibles al no existir límites físicos. Se pueden distinguir 3 niveles de montajes:

- **Configuración orto-estereoscópica:** En vez de adecuar la cámara a la escena, es la escena la que se configura teniendo en cuenta las condiciones de visión humana y la geometría específica de la pantalla. Los objetos se ven del tamaño que han sido creados, y para aumentarlos, se aumentará directamente su modelo.
- **Configuración sencilla (*stick rig*):** Usando un modelador de 3D, se enlazan las dos cámaras (siendo una el duplicado de la otra, para mantener exactamente las mismas características) mediante un palo (*stick*) que será el que se mueva y se modifique, en torno a su punto de giro.
- **Configuración compleja (*script rig*):** Se separa la imagen por planos de los objetos más significativos (desde el más cercano hasta el más alejado) y se modifica el *parallax* de cada uno de ellos. Puede hacerse programando o a través de programas especializados (por ejemplo, *VisuMotion*).

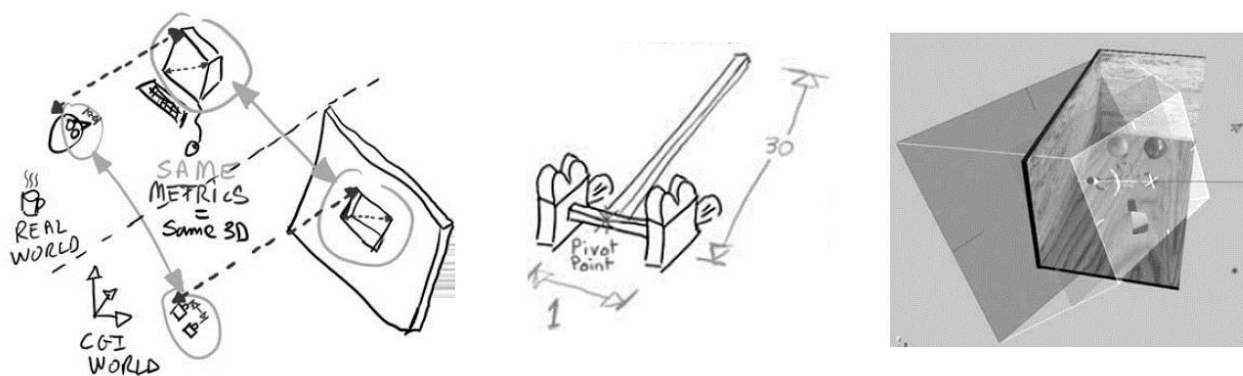


Fig. 5.8. Tipos de rigs virtuales: orto-estereoscópico, *stick* y *script*.

En animación son típicas las tomas largas y los movimientos complejos, lo que requiere ir variando la convergencia y la distancia interaxial. Por ello, se puede **animar la configuración de las cámaras**, marcando los cambios de estos valores con *keyframes* sobre la línea temporal. Cuanto más limpio sea el camino de la cámara, mejor.

Una vez más, hay numerosos programas especializados, como *Autodesk*, *Maya*, *3D Max*, *XSI*, *Toxik* o *Luster*. Los modelados suelen ser figuras grises, pero para apreciar profundidad en su lectura, se les añaden texturas.

5.3.6. Conversión de 2D nativo a 3D

También se puede crear 3D a partir de una sola película convencional 2D, generando artificialmente el segundo punto de vista. Esto sirve para rehacer películas pasadas en formato 3D, salvar malas tomas grabadas en estéreo y producir efectos más potentes. El proceso se basa en aislar los elementos visuales más importantes de la imagen y colocarlos en profundidad, utilizando una base de datos de formas o modelos 3D a medida. Algunos de los grupos más importantes desarrollando estas técnicas son *In-Three*, *Imax* y *Sassoon Film Design*.



Fig. 5.9. Imagen con segmentación automática para conversión a 3D.

Dicha conversión no puede ser totalmente automatizada, pues la segmentación de la imagen es difícil al tratarse de un proceso cognitivo (no visual). Es decir, las máquinas deberían pensar y entender el mundo como las personas, para reconocer los objetos, su contexto y su historia. Por tanto, existen cuatro métodos para crear esta profundidad artificial:

- 1. Cortar y empujar:** Se recortan los objetos que queremos poner en profundidad, se empuja el fondo tras la escena (usando la HIT), se ponen los objetos en las posiciones de profundidad deseadas y se crean perspectivas moviendo sus esquinas. Esto se realiza cuadro a cuadro, simplificando con ayuda de *keyframes* e interpolación. Consigue buen *parallax* y buena oclusión.
- 2. Mapa de profundidad y desplazamiento:** Si no se tiene hallado, se crea una capa con él sobre la imagen (al 50% de opacidad). Se pueden crear volúmenes simples con gradientes lineales o radiales, en escala de grises. No puede crear oclusión, pero define mejor las formas en profundidad de los objetos.
- 3. Reconstrucción y proyección 3D:** Se reconstruye la geometría 3D de la escena, proyectando la imagen original sobre ella y renderizando otros puntos de vista. Es el más complejo, potente y utilizado, y reduce el tiempo de *rendering*.
- 4. Parallax de movimiento:** Se convierte el movimiento horizontal en claves de profundidad (Efecto Pulfrich), por lo que sólo hay que retrasar una de las imágenes

(derecha o izquierda) para generar el segundo punto de vista. Es el más sencillo y puede usarse para convertir fondos coordinándose con el método “cortar y empujar” o como base para generar los mapas de profundidad a partir de los de movimiento.

Todos estos métodos crean agujeros en la imagen, al mover objetos que dejan fondos desconocidos. Para rellenar y “redibujar” dichos huecos, se usa contenido de los fotogramas anteriores o posteriores. Además, no son métodos independientes, sino que se pueden usar varios para una misma conversión.

A la hora de recrear el 3D, podemos elegir varias opciones. Si se recrea un ojo, el otro tendrá la resolución perfecta, y es más simple ya que sólo hay que trabajar en una imagen. Si se recrean ambos, las áreas “pintadas” son la mitad de pequeñas, el rellenado automático funciona mejor, y las perspectivas se ven menos afectadas, aunque hay que trabajar en crear dos imágenes.

5.4. Etalonaje

Cuando la película ya está lista, hay una última etapa para perfeccionar la imagen, ya que su calidad es la clave en la percepción del 3D. Se realizan correcciones de color y de profundidad, para conseguir la apariencia adecuada de cada secuencia en función de la narrativa de la misma.

5.4.1. Graduación de color

La graduación de color consiste en dar a las imágenes un aspecto y estilo determinado. Primero se realizan ajustes básicos para dejar la imagen neutra: igualar la luminosidad, el contraste y el balance de blancos de todas las tomas. Después se realizan ajustes más específicos en partes concretas de las imágenes, como correcciones de color. Por último, se da el aspecto deseado a cada secuencia mediante filtros y efectos, que potencien la narrativa de la historia y satisfagan los gustos subjetivos del director. Las herramientas que se utilizan para estos ajustes son las ruedas de color, las curvas de niveles, las curvas de luminosidad y el vectorescopio.

Este trabajo se vuelve más complejo en 3D que en 2D, porque cada tecnología de proyección (desarrolladas en el apartado 3.3 *Sistemas de proyección*) tiene una luminosidad y color diferente, requiriéndose varios paquetes distintos de un mismo máster. Primero se realiza un etalonaje convencional como en cualquier producción 2D, y después se añaden los cambios necesarios para 3D con las gafas puestas y en una pantalla lo más parecida posible a la que se vaya a usar en la proyección, para apreciar bien los detalles del resultado final.

Uno de los ajustes típicos a realizar es añadir un poco de *gamma* para **compensar la luminancia** perdida sin saturar los blancos. En algunos sistemas como el *RealD*, también se añade un poco de color magenta para **compensar el tinte verde de las gafas**, y se pasa el *ghost-busting*.

5.4.2. Graduación de profundidad

La graduación de profundidad consiste en hacer los últimos arreglos o detalles sobre las características estéreo.

Por un lado se ajusta la **divergencia**, comprobando que ningún objeto esté más allá del *parallax* máximo (en cuyo caso se movería la posición de profundidad, adelantando toda la escena, y se retocarían después sus transiciones de entrada y salida). Y por otro lado se ajustan las **distancias interaxiales**, comprobando que el paréntesis de profundidad no sea excesivamente grande. Si así fuera, se disminuiría a través de lentes virtuales y moviendo hacia delante sólo el plano de fondo.

También se lleva a cabo una **adaptación del máster a la pantalla** en la que se proyectará. Los sistemas de cine digital funcionan bajo el paradigma convergente (*parallax* cero en el plano de la pantalla) y sus proyectores permanecen alineados igual que en el máster. Sin embargo, el sistema *IMAX* sigue el paradigma paralelo (*parallax* cero en el infinito y por tanto todas las escenas con *parallax* negativos) y las imágenes proyectadas se tienen que recolocar separándolas 65 mm. Asimismo, el máster está configurado para pantallas de tamaño medio, que son las más extendidas. En el caso de pantallas más grandes, se traería toda la imagen hacia adelante a través de un valor global de HIT, para que la acción suceda más cerca y se eviten molestias en los espectadores.

Otra corrección importante es **hacer flotar la ventana estereoscópica**, que mencionamos en el apartado 3.1.2 *Ventana estereoscópica*. Se trata de usar máscaras (franjas que ponemos en negro) para eliminar ciertas partes en una de las vistas, evitando así grandes disparidades entre las dos imágenes, al apreciarse sólo la otra y con menor intensidad.

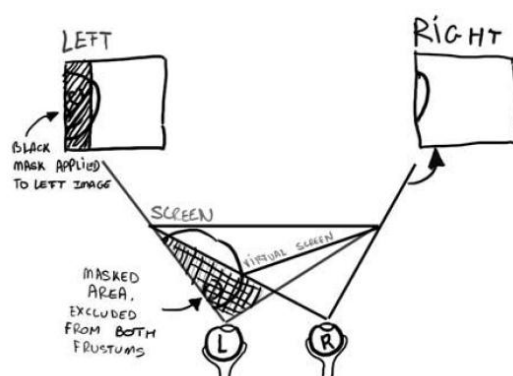


Fig. 5.10. Efecto de ventana estereoscópica flotante.

Con esta técnica se puede dar forma o mover la pantalla a nuestro gusto, produciendo una ventana virtual. Si se utilizan máscaras en el mismo lateral de ambas imágenes, se reduce su tamaño visible. Mientras que si sólo se usa máscara en una de las imágenes, cambia la posición percibida de la pantalla. Por ejemplo, al aplicarla en el lado derecho de la imagen derecha, ese borde de la pantalla parece moverse hacia el público. Si además se aplica otra máscara al lateral izquierdo de la otra imagen, la pantalla entera parecerá acercarse. Aplicando las máscaras a la inversa (máscara derecha sobre imagen izquierda y viceversa), se consigue el efecto contrario (alejar la pantalla).

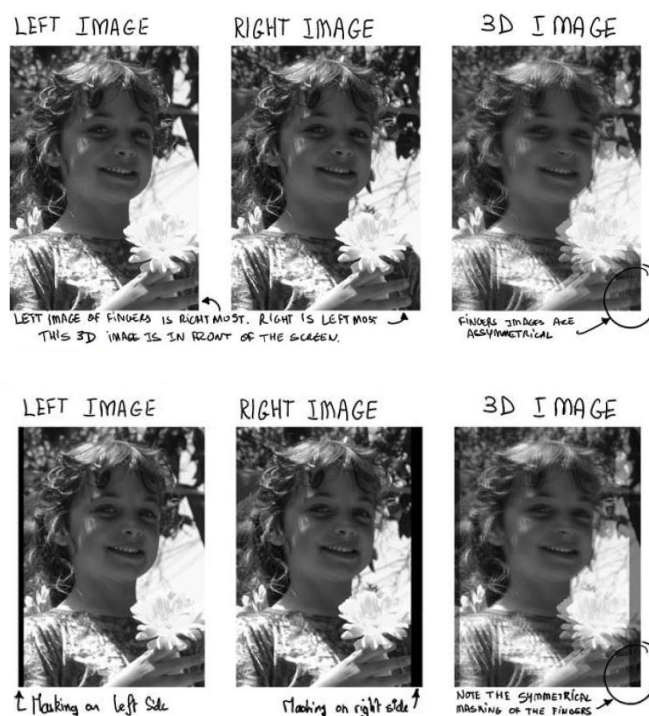


Fig. 5.11. Imagen 3D sin corrección (arriba) y con máscaras creando la ventana flotante (abajo).

Dicha ventana virtual generada puede modificarse en muchos aspectos:

- **Formas:** Las máscaras pueden ser de muchas formas. Su ancho es igual al *parallax* del objeto proyectado más uno o dos píxeles, para dejar algo de espacio entre la ventana estereoscópica y el objeto más próximo.
- **Animación:** La ventana puede mantenerse estática o hacerse dinámica modificándola a lo largo de la toma. Este movimiento es prácticamente indetectable por el público, pero muy útil para adecuar la ruptura de cuadros que

puede surgir por una acción o un movimiento de cámara.

- **Asimetría:** Se puede dar un ángulo a la ventana acercando a la audiencia más un lado que otro (muy útil en los plano/contraplano por encima del hombro típicos en escenas de diálogo entre dos personas) o acercando más la parte superior o inferior de la ventana (creando efectos como que el cielo se nos cae encima). Incluso se puede llegar a girar en torno a una esquina aplicando varios ángulos (útiles con posiciones de cámara muy dinámicas y elevados *parallax* negativos).

Por otro lado, para lograr profundidad en primeros planos que la pierden por violar la ventana estereoscópica, se utiliza el **truco del multi-rig**. Se dividen las zonas de interés de la imagen, se procesan por separado, y finalmente se componen. Se obtendrían así el primer plano sin profundidad (el original), el primer plano con redondez (utilizando mayor distancia interaxial) y el fondo (con esa misma distancia interaxial para que no se pierda la profundidad).

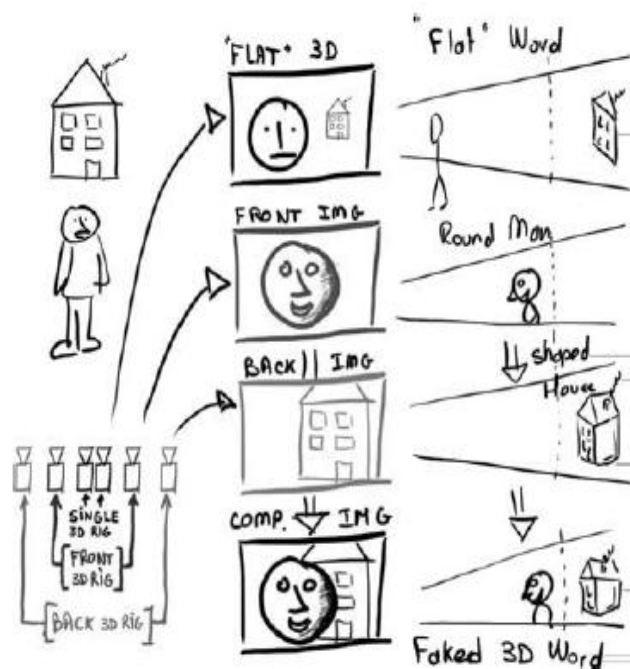


Fig. 5.12. Truco del multi-rig.

5.5. Empaquetado

Los contenidos 3D tienen dos maneras de difusión: las proyecciones cinematográficas y la venta de discos para reproducciones domésticas. Para cada uno de ellos se empaquetará la información en un formato diferente.

5.5.1. Formato para exhibición en cines

El principal destino de las películas 3D son las salas de cine. En el caso de las proyecciones analógicas se distribuyen las dos bobinas según el procedimiento habitual. En el caso digital se puede hacer llegar la copia de varias formas: entrega física en un disco duro, a través de Internet (principalmente fibra óptica) o a través de ondas satelitales.

El empaquetado se realiza según las especificaciones propuestas por el DCI (*Digital Cinema Initiative*) [30], que definen un único paquete de distribución (DCP) por cada película, sin procesados que sean compatibles con un solo sistema de visualización. Este debe contener un flujo con las películas derecha e izquierda (capturadas a 24fps) alternadas a 48fps, empezando con la izquierda. La resolución puede ser tanto 2K como 4K. La metadata (información adicional o subtítulos) irá entre ellas a 250Mbps. La pista de audio es también única, compatible tanto con la versión 2D como con la 3D, y estará basada en la imagen izquierda.

Como los datos digitales son muy vulnerables a la copia, uso no autorizado o piratería, se añade a las películas un sistema de seguridad que se desactiva al introducir en el servidor el KDM (*Key Delivery System*), un código o contraseña específico para ponerlas en funcionamiento.

También se pueden usar perfiles personalizados para proyecciones amateurs o privadas, en museos u otras salas no comerciales. Es recomendable usar una codificación de imagen con poca pérdida (como JPEG 2000), el formato Over/Under (que da buena definición en profundidad) y reducir el tamaño de cuadro antes que el ratio de compresión.

5.5.2. Formato para distribución doméstica

El formato más básico es el **DVD 3D**, aunque no hay una especificación oficial. Suele usar los sistemas anáglifo o estéreo activo. Al visualizarse en pantallas de televisión, surgen ciertos problemas por la codificación entrelazada de estas, por lo que son preferibles los monitores de ordenador.

Más calidad se consigue con los **Blu-ray Disc 3D**, que sí están estandarizados por la BDA [31] y son compatibles con los reproductores 2D convencionales. Utiliza el perfil de codificación estéreo de alta calidad MVC (*Multiview Video Coding*), una extensión del ITU-T H.264 AVC (*Advanced Video Coding*) utilizado en los reproductores 2D. Este nuevo formato MPEG4-MVC comprime las vistas izquierda y derecha con un *overhead* del 50% (comparado con su contenido equivalente de 2D), y permite una resolución de 1080p.

Además de en los reproductores de Blu-ray (tanto 3D como 2D), estos discos también pueden reproducirse en algunas videoconsolas como la *PlayStation 3* de *Sony*, para películas o juegos en tres dimensiones.

CONCLUSIONES

El cine es uno de los grandes medios de entretenimiento mundiales, que va evolucionando a medida que la tecnología avanza. A pesar de que el 3D se ha intentado implantar en varias ocasiones a lo largo de la historia, es esta vez cuando parece haberlo conseguido definitivamente. Por ello, aunque no a todos los cineastas o cinéfilos pueda gustarles, es importante que se conozcan sus entresijos para posibles producciones tridimensionales. Además, España tiene una fuerte y talentosa industria cinematográfica, tanto a nivel artístico como técnico, por lo que es recomendable que esta técnica esté también bien documentada en nuestro idioma.

Este proyecto muestra que son muchas las cuestiones a tener en cuenta al realizar una producción estereoscópica, y que cada paso y pequeño detalle que engloban las distintas etapas deben ser tenidos en cuenta y cuidados a conciencia para obtener resultados óptimos. Quizá antes de su lectura podían tenerse ciertos prejuicios sobre el 3D, considerándolo más molesto que atractivo, o pensando que es un mero duplicado de secuencias. Pero como hemos visto a lo largo de estas páginas, el buen 3D consigue potenciar al máximo la experiencia audiovisual, si se tienen en cuenta las numerosas reglas y consideraciones específicas que sólo sirven para las producciones estereoscópicas.

Por último, este estudio acerca el 3D al alcance de cualquiera, demostrando que no es algo inaccesible para *amateurs* o presupuestos más modestos, sino que es posible crearlo a partir de equipos 2D más sencillos y convencionales. Tanto en la grabación, como en la post-producción y el visionado, se han visto distintas técnicas en función de los medios disponibles, que generan diferentes niveles de calidad, pero que abren el camino a cualquier interesado hacia esta tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

Este proyecto se ha llevado a cabo gracias a algún libro y numerosas páginas web que permiten una información actualizada y con los últimos avances tecnológicos. La documentación general utilizada a lo largo de todo el proceso ha sido la siguiente:

[1] Mendiburu, Bernard. "3D Movie Making: Stereoscopic Digital Cinema from Script to Screen". Elsevier Inc., Oxford. 2009.

[2] Armenteros, M. "3D estereoscópico". E-Archivos Universidad Carlos III de Madrid. 2011. URL: http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/12929/1/estereoscopico_armenteros_2011_pp.pdf

[3] Reeve, Simon. Flock, Jason. "Basic principles of Stereoscopic 3D". Senior Editors. 2010.

[4] González, Alfredo. Web "3D Stereo Web". URL: <http://www.red3i.es/stereoweb/index.htm>

Asimismo, en cada uno de los capítulos se han consultado otras fuentes para informaciones concretas o más específicas. Esta bibliografía adicional es la que sigue:

1. INTRODUCCIÓN AL 3D

[5] "Visión binocular". E-Archivo de la Universidad de Valencia. URL: <http://www.uv.es/~ponsa/docencia/tema10vb.pdf>

[6] Martínez-Salanova, Enrique. Web "El cine en tres dimensiones". URL: <http://www.uhu.es/cine.educacion/cineyeducacion/3D.htm>

[7] Web "3D Gear". URL: <http://www.3dgear.com/scsc/movies/firsts.html>

[8] Web "Gafas 3D". URL: <http://www.gafas3d.com/>

2. PREPRODUCCIÓN DE UN PROYECTO 3D

[9] Web "Dirkvoorhoeve". 2013. URL:
<http://dirkvoorhoeve.wordpress.com/2013/02/25/general-s3d-shooting-tips/>

3. GRABACIÓN ESTEREOSCÓPICA

[10] Langford, Michael. "La fotografía paso a paso". Hermann Blume Ediciones, Madrid. 1990.

[11] Del Amo García, Alfonso. "Inspección técnica de materiales en el archivo de una filmoteca". Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. 1996.

[12] Arias Martínez, Daniel. Fernández Álvarez, Ignacio. Pérez Jiménez, David. "Desarrollo de material 3D". E-Archivos Universidad de Oviedo. 2010. URL:
<http://castor.edv.uniovi.es/~smi/5tm/10trabajos-practicos/2/Memoria.pdf>

[13] Alicea, Salvador. Web "Aprende fotografía digital". 2011. URL:
<http://www.aprendefotografiadigital.com/afd/2011/05/03/lentes-introduccion/#axzz2PO6nmhTR>

[14] Rubio, César. Web "Cinematography". 2011. URL:
<http://www.cinematography.com/index.php?showtopic=53425>

[15] Web Oficial de Kodak. URL:
http://www.kodak.com/cluster/lar/plugins/acrobat/es/motion/publicaciones/referenceGuide/plugins_acrobat_es_motion_newsletters_filmEss_05_Film_Types_and_Formats.pdf

[16] Tamez, José Luis. Web "Cine Digital". 2011. URL: <http://www.cinedigital.tv/4k-2k-2-5k-hd-ultrahd-que-es-todo-esto/>

[17] Web Oficial de Canon. URL:
[http://www.canon.es/For_Home/Product_Finder/Camcorders/High_Definition_HD/tech/Hard_Disk_Drive_recording_\(AVCHD\).asp](http://www.canon.es/For_Home/Product_Finder/Camcorders/High_Definition_HD/tech/Hard_Disk_Drive_recording_(AVCHD).asp)

[18] Crabtree, Bob. Web "Hexus". 2006. URL: <http://hexus.net/ce/news/audio-visual/6248-first-avchd-hi-def-camcorders-due-sony-september/>

[19] Web Oficial de Panasonic. URL: <http://www.panasonic.es/>

[20] Web Oficial de Sony. URL: <http://www.sony.es/>

4. PROYECCIÓN ESTEREOSCÓPICA

[21] Arias Martínez, Daniel. Fernández Álvarez, Ignacio. Pérez Jiménez, David. "Medios 3D". E-Archivos Universidad de Oviedo. 2010. URL:

<http://156.35.151.9/~smi/5tm/10trabajos-teoricos/2/Medios3D.pdf>

[22] "Historia de la visualización". E-Archivo de la Universidad de Coruña. 2010. URL:

<http://sabia.tic.udc.es/gc/Contenidos%20adicionales/trabajos/Hardware/HistoriaVisual/3d-ti-singafas.html>

[23] Web "Estereocosas". 2008. URL: <http://estereocosas.webs.com/>

[24] Web Oficial de DLP Texas Instruments. URL: <http://www.dlp.com/es/>

[25] Gómez, Serxio. Web "Cine Digital 3D". 2010. URL: <http://www.cinedigital3d.net/2010/01/sistemas-de-proyeccion-digital-3d.html>

[26] Web Oficial de IMAX. URL: <http://www.imax.com/>

5. PROCESADO DEL MATERIAL ESTEREOSCÓPICO

[27] Montgomery, Mark. Web "VideoMaker". 2012. URL: <http://www.videomaker.com/article/15325-selecting-the-right-video-editing-software>

[28] Web "Topyaps". 2012. URL: <http://topyaps.com/top-10-best-video-editing-software/>

[29] Aldous, Barry. Web "Stereoscopic Society". URL: <http://www.stereoscopicsociety.org.uk/Resources/Creating%20Stereoscopic%20Content%20For%203D-TV%20viewing%20.pdf>

[30] Digital Cinema Initiatives, LLC. "*Stereoscopic Digital Cinema Addendum*".
2007. URL: http://dcimovies.com/specification/DCI_Stereoscopic_DC_Addendum.pdf

[31] Web Oficial de Blu-ray Disc. URL: <http://www.blu-raydisc.com/>